

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Industrial

### Estudio preliminar con Elementos Finitos de estampación en caliente

Autor: Irene Madrazo Ramil

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

**Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

**Universidad de Sevilla**  
Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

# **Estudio preliminar con Elementos Finitos de estampación en caliente**

Autor:

Irene Madrazo Ramil

Tutor:

Luis Valentín Bohórquez Jiménez

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo de fin de Máster: Estudio preliminar con Elementos Finitos de estampación en caliente.

Autor: Irene Madrazo Ramil

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis amigos*





# Agradecimientos

---

En primer lugar, quería darles las gracias a mis padres, por haberme apoyado en todas las decisiones importantes y animarme a estudiar el Máster de Ingeniería Industrial. También a mis amigos y en especial a José.

Finalmente, a mi tutor del proyecto, Luis Valentín, por haberme guiado en la realización del mismo y ayudarme siempre que lo he necesitado, sin él no habría sido posible. También agradezco todo lo que he aprendido.

Gracias a todos.

*Irene Madrazo Ramil*

*Sevilla, 2021*



# Resumen

---

En el presente trabajo, el objetivo será el estudio de varias series de forjas modificando numerosos parámetros como la temperatura o las condiciones del proceso mediante el software de elementos finitos, Deform-3D. Se verá el comportamiento de las forjas sometidas a diferentes sollicitaciones, bajo determinadas hipótesis y las conclusiones obtenidas de las presentes simulaciones. Este software de diseño esta basado en el método de elementos finitos.

El análisis de elementos finitos (FEM) es un método computarizado para predecir cómo reaccionará un producto ante las fuerzas, la vibración, el calor, el flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real. Una técnica de simulación por ordenador usada en ingeniería. El análisis de elementos finitos muestra si un producto se romperá, desgastará o por el contrario, funcionará como se espera.

En este proyecto nos centraremos en sacar conclusiones en base a la modificación de ciertos parámetros como puede ser la variación de la temperatura, el tipo de conformado, la geometría de la preforma o la velocidad de empuje de la forja y observar si esos resultados son o no posibles, son los esperados y descubrir que hace el programa internamente en función de las variables introducidas.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Descripción del estudio</b>	<b>1</b>
<b>2 Objetivos y aclaraciones</b>	<b>3</b>
<b>3 Forja y temperaturas</b>	<b>5</b>
3.1 Temperaturas del análisis	5
3.2 Temperaturas del análisis	6
3.2.1 Recristalización	7
<b>4 Datos de referencia</b>	<b>9</b>
<b>5 Análisis de los parámetros</b>	<b>11</b>
<b>6 Estudios realizados y resultados</b>	<b>13</b>
6.1 Análisis de sensibilidad del número de elementos	13
6.1.1 Análisis de mallado en frío	14
6.1.2 Análisis de mallado en caliente	15
6.2 Diferencias entre cold y warm forming, hot forging y heat transfer fijando los mismos parámetros de referencia	16
6.2.1 Frío, tibio y caliente	16
6.2.2 Tensiones	20
6.2.3 Temperatura	21
6.2.4 Valores extremos	22
6.2.5 Transferencia de calor	25
6.3 Conformado en tibio y caliente. Diferencias encontradas	25
6.4 Propiedades mecánicas del material	27
6.5 Ecuaciones de comportamiento	29
6.6 Recristalización	31
6.7 Conformado a temperatura de fusión	31
6.8 Cambio del tipo de herramienta utilizada	35
6.8.1 Tensiones	36

6.8.2	Temperatura	37
6.8.3	Número de pasos	39
6.9	<i>Variación de la velocidad de empuje de la herramienta</i>	40
6.9.1	Carga	40
6.9.2	Energía	40
6.9.3	Velocidad	41
6.9.4	Tensiones	42
6.9.5	Temperatura	44
6.10	<i>Variación de la carrera</i>	45
6.10.1	Carga y energía	45
6.10.2	Tensiones	47
6.10.3	Velocidad	48
6.10.4	Temperatura	49
6.11	<i>Variación del diámetro de la preforma</i>	50
6.11.1	Carga y energía	50
6.11.2	Relación entre la tensión y la temperatura	53
6.11.3	Variación de la velocidad	57
6.11.4	Variación de las estampas	60
6.12	<i>Estudio de la temperatura máxima alcanzada después del proceso</i>	61
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Rango de temperaturas según el tipo de conformado	6
Tabla 2. Variación de las propiedades del material según el tipo de conformado	7
Tabla 3. Datos de referencia. Conformado en frío	9
Tabla 4. Datos de referencia. Conformado en tibio o en caliente	9
Tabla 5. Variación de la carrera y el tiempo del proceso según el número de elementos	16
Tabla 6. Variación de varios parámetros según el tipo de conformado para $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$	17
Tabla 7. Variación de las tensiones entre frío y caliente para diferentes valores de temperatura	20
Tabla 8. Relación entre la temperatura máxima alcanzada y la temperatura de conformado	21
Tabla 9. Porcentaje de incremento de la temperatura en diferentes piezas	22
Tabla 10. Variación de varios parámetros según el tipo de conformado para $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	23
Tabla 11. Variación de varios parámetros según el tipo de conformado para $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	23
Tabla 12. Variación de varios parámetros según el tipo de conformado para $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$	24
Tabla 13. Diferencia entre los valores del conformado en frío y en caliente	24
Tabla 14. Comparación entre el conformado en tibio y en caliente de otros parámetros	26
Tabla 15. Propiedades mecánicas del acero AISI-1045 ( $20\text{-}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	27
Tabla 16. Comparación de propiedades del mismo acero con diferentes rangos de temperatura	28
Tabla 17. Comparación de resultados del mismo acero con diferentes rangos de temperatura	28
Tabla 18. Resultados variando el rango de temperatura del material y el tipo de conformado	29
Tabla 19. Análisis de casos imposibles	30
Tabla 20. Resumen de las tensiones obtenidas con diferentes herramientas y fuerzas	37
Tabla 21. Análisis del número de pasos para empuje y herramienta	39
Tabla 22. Rango de valores entre la velocidad mínima y máxima de empuje escogida	41
Tabla 23. Comparación de la velocidad adquirida en el proceso según la velocidad de empuje	42

Tabla 24. Comparación de los diferentes valores de tensión según la velocidad de empuje	43
Tabla 25. Rango de tensiones para cada caso entre la velocidad máxima y la mínima escogida	44
Tabla 26. Incremento de temperatura variando la velocidad de empuje	44
Tabla 27. Análisis de la velocidad máxima para diferentes valores de carrera	48
Tabla 28. Análisis de la velocidad mínima para diferentes valores de carrera	48
Tabla 29. Porcentaje de incremento producido para diferentes valores de carrera	49
Tabla 30. Rango de carga entre frío y caliente para diferentes diámetros	51
Tabla 31. Rango de energía entre frío y caliente para diferentes diámetros	52
Tabla 32. Comparación de la carga y la energía de los dos aceros. Conformado en frío	53
Tabla 33. Comparación de la carga y la energía de los dos aceros. Conformado en caliente	53
Tabla 34. Rango de tensión para diferentes valores de diámetro. Frío. DIN-100Cr6	54
Tabla 35. Rango de tensión para diferentes valores de diámetro. Frío. AISI-1045	54
Tabla 36. Rango de tensión para diferentes valores de diámetro. Caliente. DIN-100Cr6	54
Tabla 37. Rango de tensión para diferentes valores de diámetro. Caliente. AISI-1045	55
Tabla 38. Variación de la tensión para diferentes temperaturas y diferentes estudios	56
Tabla 39. Incremento de la temperatura final para diferentes diámetros. DIN-100 Cr6	56
Tabla 40. Incremento de la temperatura final para diferentes diámetros. AISI-1045	57
Tabla 41. Variación de la velocidad para varios diámetros. Conformado en frío	58
Tabla 42. Variación de la velocidad para varios diámetros. Conformado en caliente	58
Tabla 43. Comparación entre frío y en caliente para los valores de velocidad máxima	59



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Forja libre	5
Figura 2. Método de los elementos finitos	13
Figura 3. Variación de la carga según el número de elementos. Conformado en frío	14
Figura 4. Variación de la velocidad según el número de elementos. Conformado en frío	14
Figura 5. Variación de la energía según el número de elementos. Conformado en frío	15
Figura 6. Variación de la carga según el número de elementos. Conformado en caliente	15
Figura 7. Variación de la carga entre frío y caliente para varias temperaturas	18
Figura 8. Variación de la energía entre frío y caliente para varias temperaturas	18
Figura 9. Diferencia entre la tensión máxima y mínima para varias temperaturas. Conformado en frío	19
Figura 10. Diferencia entre la tensión máxima y mínima para varias temperaturas. Conformado en caliente	19
Figura 11. Incremento de la temperatura para diferentes temperaturas de conformado	21
Figura 12. Comparación entre el conformado en tibio y en caliente para varios parámetros	26
Figura 13. Tensiones finales en una pieza sometida a un proceso de fusión a 2000 °C	33
Figura 14. Temperatura final de una pieza sometida a un proceso de fusión a 2000 °C	33
Figura 15. Tensiones finales en una segunda pieza sometida a un proceso de fusión	34
Figura 16. Temperatura final de una segunda pieza sometida a un proceso de fusión	35
Figura 17. Distribución de tensiones mediante un golpe de martillo a 6000 lb	36
Figura 18. Distribución de tensiones mediante un golpe de martillo a 2000 lb	37
Figura 19. Incremento de temperatura para varios casos realizados con velocidad de empuje	38
Figura 20. Incremento de temperatura para varios casos realizados con herramientas	38
Figura 21. Variación de la carga con diferentes velocidades de empuje	40
Figura 22. Variación de la energía con diferentes velocidades de empuje	41

Figura 23. Variación de la tensión mínima diferentes velocidades de empuje	42
Figura 24. Variación de la tensión máxima diferentes velocidades de empuje	43
Figura 25. Variación de la carga para diferentes valores de carrera	45
Figura 26. Variación de la energía para diferentes valores de carrera	46
Figura 27. Variación de la tensión mínima para diferentes valores de carrera	47
Figura 28. Variación de la tensión máxima para diferentes valores de carrera	47
Figura 29. Variación de la carga para diferentes valores de diámetro	51
Figura 30. Variación de la energía para diferentes valores de diámetro	52
Figura 31. Variación de la velocidad máxima para diferentes valores de diámetro	59
Figura 32. Variación de la energía y la velocidad mínima modificando las estampas	60
Figura 33. Variación de la carga y la energía modificando las estampas	61

# 1 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

---

El objetivo del presente documento será simular una serie real de procesos de forja, teniendo en cuenta los cambios de propiedades mecánicas, y los fenómenos de recristalización del material, puesto que se trata de conformado en caliente. Se utilizará el software de elementos finitos Deform-3D.

Se realizarán diferentes modelos simplificados de forjas en las que se introducirá la variación de algún parámetro, con el objetivo de analizar los cambios de las propiedades del elemento.

Los diferentes procesos tendrán lugar mediante una deformación en frío, en tibio y en caliente, donde se realizarán sucesivas comparaciones mediante la variación de temperatura.

Con el software para piezas 3D se simulará un proceso cualquiera y se deberá interpretar los resultados: si es o no posible, dónde se encuentran las mayores tensiones, la deformación que sufre la pieza o el número de pasos que se necesitan, entre otros. Se partirá de unas condiciones iniciales para llegar a unos determinados resultados.

Existen números parámetros que tendrán lugar en el estudio, pero los más importantes y en los que nos centraremos serán los siguientes: la tensión efectiva en las distintas partes de la pieza y su variación, la temperatura final alcanzada por el material, la velocidad en cada uno de los diferentes puntos. Finalmente, los valores de carga y energía. Todos ellos se describirán en el apartado 6.



## 2 OBJETIVOS Y ACLARACIONES

---

A medida que se avance en el documento, se irán desglosando y explicando cada uno de los puntos a tratar, pero se podrían resumir en los siguiente:

- Analizar si el programa muestra resultados coherentes, que corresponden con lo que ocurriría en la realidad.
- Si los resultados son coherentes.
- Diferencias encontradas entre los tipos de análisis que se verán: frío, tibio y caliente.
- ¿Qué ocurrirá con la recrystalización?
- ¿Qué ocurre con las ecuaciones de comportamiento del material?
- Análisis de las temperaturas máximas alcanzadas.
- ¿En qué parte se encuentran las mayores tensiones?
- Comparación de distintas series de forjas:
  - Variación del tipo de análisis con la misma temperatura.
  - Variación de la velocidad de empuje.
  - Variación del diámetro de la preforma.
  - Variación de la carrera escogida.
  - Diferencias encontradas entre golpe y empuje, es decir, cambio de herramienta (y, por consiguiente, de la fuerza aplicada en vez de una velocidad constante).

Se va a estudiar el comportamiento de una forja sencilla. La estampa de la forja será un cilindro que tenga el mismo diámetro que altura ( $D = H = 100 \text{ mm}$ ) y únicamente se tendrán en cuenta las variaciones producidas en la preforma, aunque se necesiten dos estampas, una en la parte superior y otra en la inferior, para poder llevar a cabo el forjado.

Nos centraremos en el empuje con una velocidad constante para intentar comprender el comportamiento de las forjas, sin embargo, también se verá algún análisis de golpe con fuerza  $N$  para apreciar las diferencias existentes entre ambos.

Cuando se hable sobre materiales no diferentes, no se refiere exclusivamente al material en sí, sino también al rango de temperaturas que maneja. En la librería de Deform-3D, existen varios materiales iguales, pero que tienen diferentes rangos de temperaturas de aplicación y por ende no son iguales.

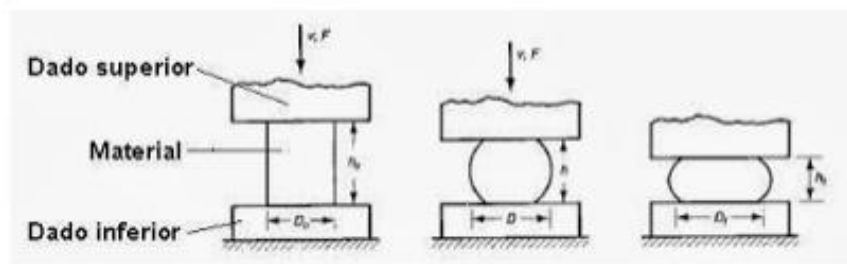


## 3 FORJA Y TEMPERATURAS

### 3.1 Introducción a los procesos de forja y estampación

Al igual que la laminación y la extrusión, el **forjado** es un proceso de fabricación de objetos, conformado por deformación plástica que se puede realizar en caliente o en frío y en el que la deformación del material se produce por la aplicación de fuerzas de compresión.

Si las matrices son planas, la operación se denomina forja libre.



**Figura 1:** Forja libre.

Este proceso se utiliza para dar forma y unas propiedades determinadas a los metales y aleaciones a los que se aplica grandes presiones. Esta deformación puede realizarse mediante prensas o por impacto.

Al ser un proceso de conformado de metales, no se produce arranque de viruta.

Por otra parte, la **estampación** es un tipo de proceso de fabricación por el cual se somete un metal a una carga de compresión entre dos moldes, las matrices ya no son planas, como en el caso de la forja libre, son matrices de forma y se denominan estampas. Por lo general, una de ellas es móvil y la otra fija.

Al ser un proceso de conformado de metales, no se produce arranque de viruta.

En el presente proyecto se trabajará con matrices planas, sin embargo, en el análisis final no se tendrán en cuenta los cambios de temperatura que se producen en las dos matrices, así que se centrará en la deformación de la preforma. Las estampas serán necesarias para que se produzca el forjado.

### 3.2 Temperaturas del análisis

En el presente trabajo, se realizarán tres análisis: **frío, tibio y caliente**. El programa Deform-3D también da la opción de realizar sobre una pieza una transferencia de calor, bien para que la pieza se enfríe pasado un periodo de tiempo  $t$  o, por el contrario, para que el entorno actúe como un horno y la pieza se caliente; esta modalidad se comentará, pero no será objeto de estudio, centrándonos únicamente en las opciones *cold*, *warm* y *hot*.

Una de las partes más importantes es la temperatura elegida y el tipo de conformado, es decir, frío, tibio o caliente. A continuación, se detallará la distribución de los rangos de temperatura. Sin embargo, se hace necesario recalcar, que no se deformará la pieza con la temperatura correspondiente a cada uno de los rangos, debido a que una de las partes más importantes del trabajo es saber si la pieza se deforma conforme lo haría en la realidad, y más adelante se comprobará que si la temperatura elegida no corresponde al tipo de análisis elegido, el programa siempre dará un resultado que distará mucho del comportamiento real.

El material elegido en prácticamente todas las series de forjas es AISI-1045, un acero con una temperatura de fusión de 1100 °C y la temperatura de fusión en grados kelvin quedaría:

$$0\text{ °C} = 273,15\text{ K} \quad (1)$$

$$1100 + 273,15 = 1373,15\text{ K}$$

Por consiguiente, la escala de temperaturas y el tipo de conformado será el siguiente:

**Tabla 1:** Rango de temperaturas según el tipo de conformado.

Tipo de análisis	Rango	Valores medios
Frío ( <i>cold</i> )	$T < 0,3$	$0,15 \cdot T_m$
Tibio ( <i>warm</i> )	$T = 0,3-0,5$	$0,4 \cdot T_m$
Caliente ( <i>hot</i> )	$T = 0,65$	$0,65 \cdot T_m$
Fusión	$T = 0,7-0,9$	$0,8 \cdot T_m$
Recristalización	$T > 0,5$	$0,5 \cdot T_m$

En la columna rango, se ha establecido las temperaturas correspondientes a ese análisis y en valores medios la media de cada uno, donde tendremos una temperatura de referencia para cada tipo de deformación.

De esta forma, tendremos lo siguiente:

- Frío:  $T = 0,15 \cdot 1373,15\text{ K} \approx 300\text{ °C}$ .
- Tibio:  $T = 0,4 \cdot 1373,15\text{ K} \approx 500\text{ °C}$ .
- Caliente:  $T = 0,65 \cdot 1373,15\text{ K} \approx 800\text{ °C}$ .



Se volverá a recalcar que se utilizarán un amplio abanico de temperaturas correspondientes a cada análisis, indistintamente, para poder deducir y analizar cómo se comportará el programa.

Con la deformación en caliente el material se deforma plásticamente (irreversible) mediante la aplicación de cargas externas de compresión.

### 3.2.1 Recristalización

$T = 0,5 \cdot T_m$ , es decir, cuando el conformado es en caliente, siempre hay recristalización, y con ello, el reordenamiento de los granos del material.

A continuación, se adjuntará una tabla a modo de resumen con las variaciones de las propiedades frente a la temperatura:

**Tabla 2:** Variación de las propiedades del material según el tipo de conformado.

Trabajo en frío (disminución de la temperatura)	Aumenta	Dureza y fragilidad
		Esfuerzo de fluencia
		$n$ ( $n > 0$ )
	Disminuye	Velocidad de deformación (hasta $\dot{\epsilon} = 0$ )
		Ductilidad
Trabajo en caliente (aumento de temperatura)	Aumenta	Ductilidad y tenacidad
		Límite elástico y resistencia
		Velocidad de deformación
	Disminuye	Endurecimiento por deformación (hasta $n = 0$ )
		Resistencia



## 4 DATOS DE REFERENCIA

Según cada una de las diferentes series de forjas, se cambiarán algunos u otros datos. Sin embargo, algunos de ellos no variarán puesto que no se consideran relevantes para el estudio o bien por simplificación del mismo.

**Tabla 3:** Datos de referencia. Conformado en frío.

<b>Temperatura ambiente</b>	No dan la opción de modificarla Deformación a T cte, es decir, la de la pieza
<b>Número de elementos</b>	35.000
<b>Complejidad de la forma</b>	Complejidad y precisión moderadas
<b>Material</b>	AISI-1045 (20-1100 °C)
<b>Dimensión de la preforma</b>	D = 100 mm; H = 100 mm
<b>Dimensión de las dos estampas</b>	D = 170 mm; H = 10 mm
<b>Condiciones de contorno</b>	-
<b>Herramienta/velocidad</b>	0,2 m/s
<b>Carrera</b>	40 mm

**Tabla 4:** Datos de referencia. Conformado en tibio o en caliente.

<b>Temperatura ambiente</b>	20 °C
<b>Temperatura de las estampas</b>	150 °C
<b>Número de elementos</b>	35.000
<b>Complejidad de la forma</b>	Complejidad y precisión moderadas
<b>Material</b>	AISI-1045 (20-1100 °C)
<b>Dimensión de la preforma</b>	D = 100 mm; H = 100 mm
<b>Dimensión de las dos estampas</b>	D = 170 mm; H = 10 mm
<b>Condiciones de contorno</b>	-
<b>Herramienta/velocidad</b>	0,2 m/s
<b>Carrera</b>	40 mm
<b>Coefficiente de convección</b>	20 W/m <sup>2</sup> K
<b>Coefficiente de transferencia de calor</b>	5 W/m <sup>2</sup>

Se deben dejar claros varios puntos:

Como se plasmó en la tabla la temperatura ambiente en el conformado en tibio o en caliente es de 20 °C y con el valor con el que se jugará será con la variación de la temperatura de la pieza. De la misma manera, el coeficiente de convección será siempre el mismo. Por eso es muy importante resaltar que los resultados serán partiendo de esos parámetros fijos.

Se ha seleccionado la opción de modificación únicamente en la preforma y no en las estampas, debido a que esta última opción sería demasiado complicada y generaría demasiadas variables que tener en cuenta en los resultados. Se ha seleccionado una temperatura de las estampas de 150 °C (la que venía por defecto en el programa), pero se podía haber seleccionado cualquiera puesto que no influiría en los resultados de la estampa.

Este último punto se comprobará en el apartado de variación del diámetro donde se ve que la misma preforma con distintas estampas, produce idénticos resultados.

El material elegido ha sido AISI-1045 para el rango de temperaturas comprendido entre 20 y 1100 °C. Cuando se use el AISI-1045 *COLD* (20 °C) u otro tipo, se especificará.

## 5 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS

---

Antes de comenzar a analizar los resultados, es importante definir cada una de las diferentes variables que se obtendrán:

**Carga (MN):** Es el valor de la fuerza resultante en Newton, como consecuencia del golpe.

Durante el forjado la fuerza aumenta debido al enfriamiento del material en contacto con las matrices.

**Energía (MN.mm):** Es la energía debida al aumento de temperatura a lo largo del proceso de forjado, es decir, la energía interna, ya que el material ha sufrido una deformación plástica como consecuencia del golpe. Por otro lado, cabe resaltar que los valores tanto de energía como de fuerza, hacen referencia a la estampa de arriba, que es la que realiza el movimiento descendente.

De igual manera, cuando hablemos a lo largo del documento sobre energía, siempre se estará hablando de la energía interna.

**Leyes de comportamiento del material:** Relacionan tensiones y deformaciones. El sistema tiene que tener compatibilidad entre las deformaciones diferenciales y la deformación global del cuerpo y, por otra parte, compatibilidad entre los desplazamientos y las deformaciones.

La ecuación de comportamiento dependerá del material (con unas características fijadas), de la temperatura, el tipo de proceso, la presión y la carrera, entre otros.

Resultados diferentes parten de unas condiciones diferente y eso lleva a que las ecuaciones de comportamiento sean también distintas.

**Tensión efectiva, Stress (MPa):** Es el valor que se obtiene en los diferentes puntos de la pieza después de la deformación en el programa. Posee unidades físicas de presión: fuerza aplicada sobre un diferencial por unidad de área.

Es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión y con los valores en cada punto de la pieza podremos saber qué zonas están plastificando y con el estado tridimensional de tensiones se podrá calcular si la pieza rompe, mediante el **criterio de Von Mises**.

A partir de ahora, cuando se hable de tensión, siempre nos referiremos a la tensión efectiva.

$$\sigma_e(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_x, \tau_{yz}, \tau_{zy})$$

Se debe resaltar que no todas las tensiones son presiones. Así, definimos este último concepto de la siguiente manera:

**Presión (MPa):** El valor de la presión en los diferentes puntos de la pieza después de la deformación es la **presión tangencial**. La tensión circunferencial es un tipo de esfuerzo mecánico de elementos de forma cilíndrica o esférica, como resultado de una presión interna o externa. Esta

presión se aplica en los diferentes puntos de la cara externa de la preforma, como consecuencia del forjado.

Es importante dejar claro que cuando se habla de presión (sin ser la presión tangencial) se está hablando de mecánica de líquidos, ya que los fluidos ejercen presión sobre el fondo del recipiente donde se encuentran. Sin embargo, cuando se habla de tensión, hablamos de sólidos.

**Punto de fusión ( $T_m$ ):** Se define como la temperatura a la que una sustancia cambia de estado sólido a estado líquido. Se expresa siempre en Kelvin (K).

**Rango ( $\Delta$ ):** En este documento cuando hablemos del rango de un parámetro concreto como la velocidad o la tensión, nos referiremos a la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de ese parámetro. En cambio, si se habla de rango comparando el conformado en frío y en caliente, será la diferencia de los dos valores.

El rango tiene las mismas unidades que la variable de la que se hable.

**Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ):** Es el valor que se alcanza después del conformado. Los valores más importantes que se tendrán en cuenta serán la temperatura de conformado y la temperatura máxima alcanzada en la pieza. En el *Database* se podrá visualizar el valor en cada punto de la preforma.

En frío este valor será constante como se verá. En cambio, cuando realizamos el forjado en tibio o en caliente, la temperatura juega un valor muy importante, y en el documento se analizará porque en unos casos sube más que en otros.

**Velocidad (m/s):** Se debe diferenciar entre el empuje en mm/s con valor constante, es decir, la velocidad del mazo (velocidad en el eje x, y, z, la velocidad de deformación de la herramienta), la carga en N que se le aplica a la estampa superior también de valor constante y la distribución de velocidades en cada punto de la preforma después del conformado, una vez que se ha producido la deformación.

Esa distribución de velocidades no será constante, y tendrá un valor máximo en la estampa superior, debido a la presión ejercida y el sumatorio de presiones a cada segundo que pasa, en cambio, en la estampa inferior esa velocidad será mínima.

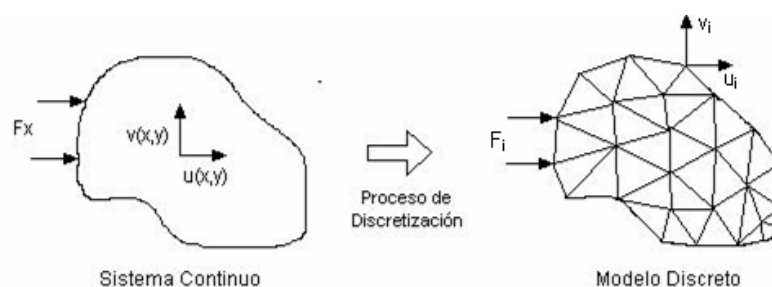
## 6 ESTUDIOS REALIZADOS Y RESULTADOS

### 6.1 Análisis de sensibilidad del número de elementos

El primer paso a la hora de realizar los modelos es determinar un tamaño de malla con el que trabajar siempre. A mayor número de elementos de mallado el modelo será más preciso, sin embargo, el tiempo de simulación será mayor y, en consecuencia, el proceso será mucho más complejo.

Antes de comenzar, hay que definir el tipo de sistema donde se trabajará. En los **problemas discretos**, el modelo tiene un número finito de componentes bien definidos, en cambio, en los **sistemas continuos**, la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema sólo puede definirse haciendo uso de la función matemática del infinitésimo (no es el caso).

Se trabajará siempre en un medio discreto, donde el elemento a estudiar estará formado por un número finito de puntos.



**Figura 2:** Método de los elementos finitos.

Para solucionar la dificultad que poseen los problemas continuos, existen diversos métodos de discretización. Se efectuará una aproximación de tal manera que la solución se aproxime a la solución continua verdadera.

La base de este análisis consiste en descomponer un objeto real en un gran número de elementos finitos: cuanto más fino sea el mallado, más precisa será la solución. Las ecuaciones matemáticas permiten predecir el comportamiento de cada elemento.

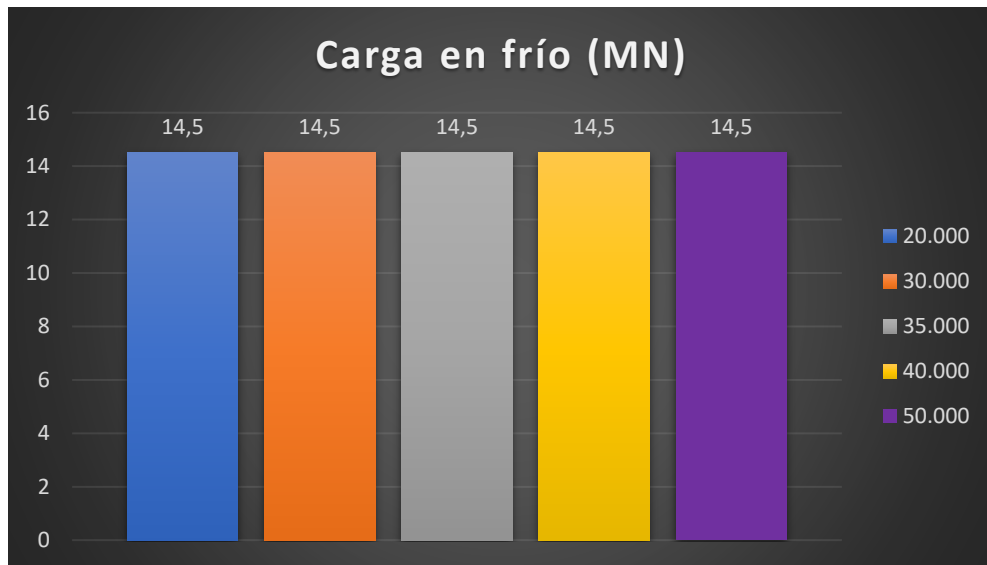
La definición del método de elementos finitos como procedimiento de aproximación de problemas continuos, argumenta que el continuo se divide en un número finito de partes (elementos que forman el mallado), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros.

Ahora bien, ¿cómo sabremos que cuántos elementos formarán la malla óptima? El tamaño de malla menor que haga que los resultados, bien sean de carga, temperatura o presión, en cualquier paso y bajo las mismas condiciones de partida a penas varíen.

Se analizarán dos modelos, uno en frío y otro en caliente y se comprobará que el resultado es exactamente igual, al igual que se partirán de distintas condiciones para cada uno de ellos.

### 6.1.1 Análisis de mallado en frío

En este análisis se mostrarán los resultados de las gráficas de carga, velocidad máxima y energía en el último paso. En los valores de energía, se estabiliza en 35.000 elementos, por lo tanto, se elige ese valor de mallado.

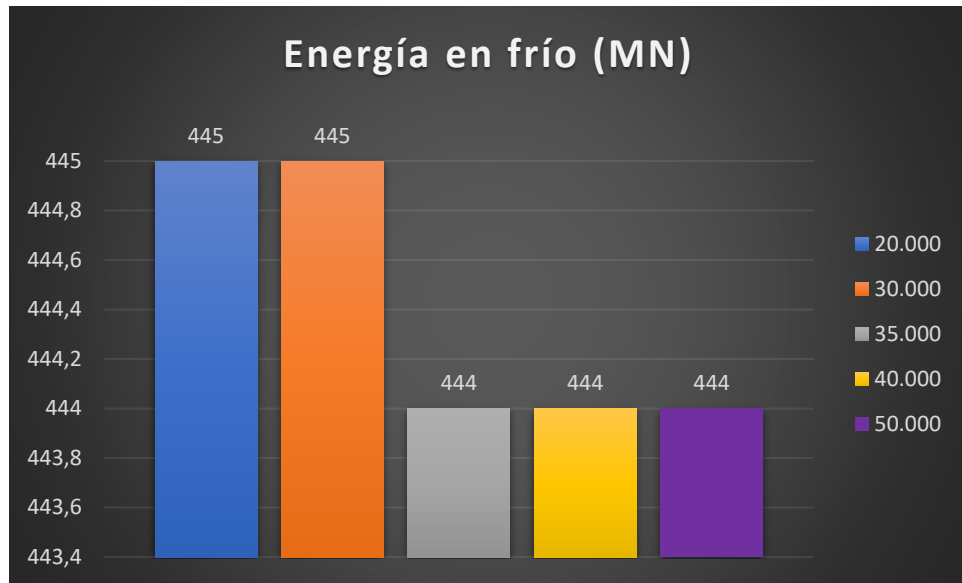


**Figura 3:** Variación de la carga según el número de elementos. Conformado en frío.



**Figura 4:** Variación de la velocidad según el número de elementos. Conformado en frío.





**Figura 5:** Variación de la energía según el número de elementos. Conformado en frío.

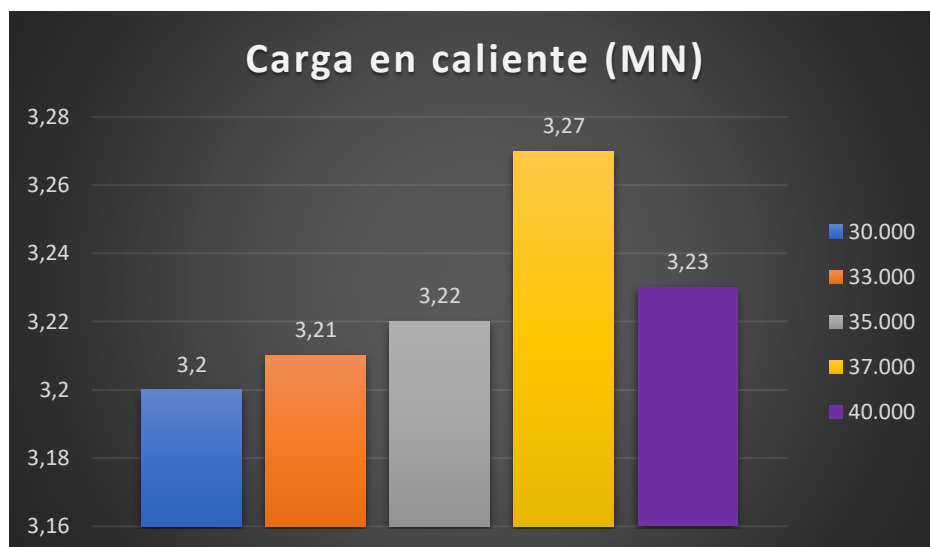
Para comprobar que estos valores son aceptables, se fijará el margen de error en el 1 %. De esta manera, el error obtenido será el siguiente:

$$445 \text{-----} 100 \%$$

$$444 \text{-----} X \%$$

$X = 99,77 \%$ , el error se sitúa en menos de un 0,25 %. Es aceptable y se elige el tamaño de malla más pequeño que cumpla con el error.

### 6.1.2 Análisis de mallado en caliente



**Figura 6:** Variación de la carga según el número de elementos. Conformado en caliente.

Analizándolo de la misma manera, el error más pequeño cometido es con 35.000 elementos de mallado. Para 35.000:

$$3,23 \text{-----} 100 \%$$

$$3,22 \text{-----} X \%$$

$X = 99,69 \%$ , por lo tanto, el error se sitúa en menos de un  $0,31 \%$ .

Para 33.000, tenemos lo siguiente:

$$3,23 \text{-----} 100 \%$$

$$3,21 \text{-----} X \%$$

El porcentaje se sitúa en torno al  $0,61 \%$ , mayor que con el mallado anterior.

Se expondrán unos datos obtenidos de la simulación en cada uno de los casos (en el paso final) con ello, se concluirá que la menor malla que satisface el error permitido se puede situar en 35.000 elementos y a partir de ahora el resto de las simulaciones se harán con ese número de elementos finitos.

**Tabla 5:** Variación de la carrera y el tiempo del proceso según el número de elementos.

Elementos	Carrera (mm)	Tiempo (s)
30.000	50	0,25
33.000	50,3778	0,251889
35.000	50,3815	0,251907
37.000	50	0,25
40.000	50,4247	0,252123

## 6.2 Diferencias entre *cold* y *warm forming*, *hot forging* y *heat transfer* fijando los mismos parámetros de referencia

Para este punto se analizarán tres valores de temperaturas diferentes, cada una correspondiente a la franja de trabajo en frío, en tibio y en caliente. Se estudiarán los valores de carga, energía y presión y temperatura máxima alcanzada y se registrarán las diferencias de cada estudio fijando el mismo valor de temperatura.

### 6.2.1 Frío, tibio y caliente

Serán analizados los resultados obtenidos partiendo de los mismos parámetros de referencia y a una temperatura fija, para  $T = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 6:** Variación de varios parámetros según el tipo de conformado para T = 500 °C.

Parámetros	Frío	Tibio	Caliente
Carga (MN)	11	9,02	9,02
Energía (MN.mm)	399	360	360
Tensión mínima (MPa)	635	630	630
Tensión máxima (MPa)	680	670	670
Temperatura máxima (°C)	500	683	683

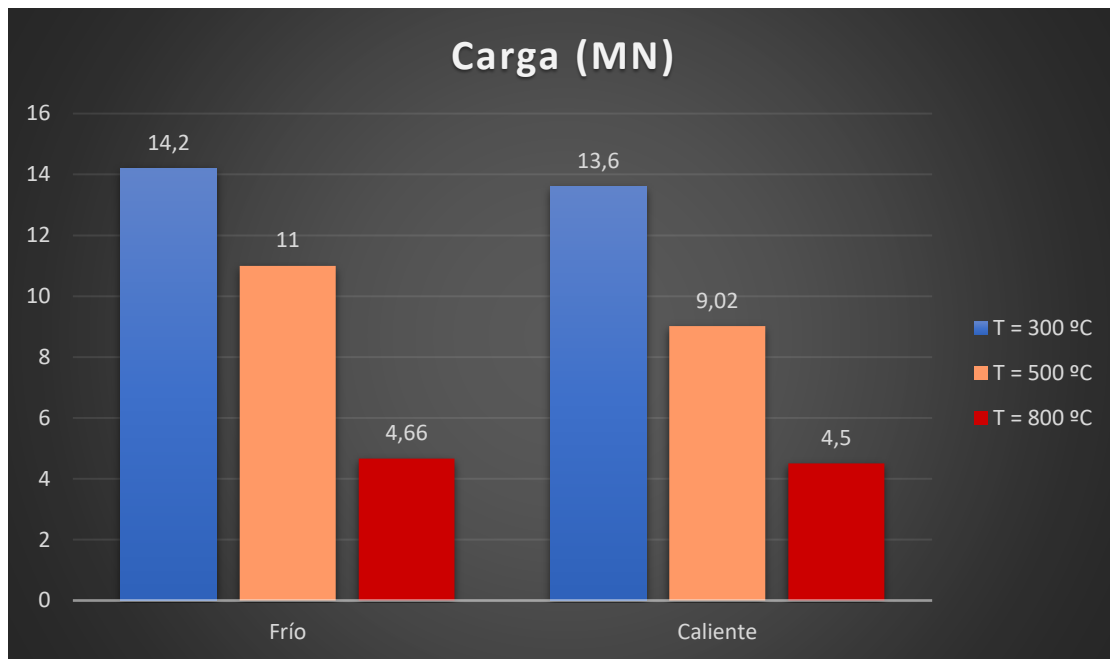
A simple vista, se pueden evaluar varias cosas:

En primer lugar, como sabemos que el conformado en frío ocurre a temperatura constante, la temperatura alcanzada será la misma que la temperatura del conformado: no habrá variación de temperatura, pero en tibio y en caliente sí existe un cambio de temperatura ya que la pieza se calienta y existirá un cambio, por lo que afirmamos que las ecuaciones de comportamiento de la pieza en frío y en caliente y tibio sí son distintas. La recristalización ocurre a nivel interno y únicamente depende del material.

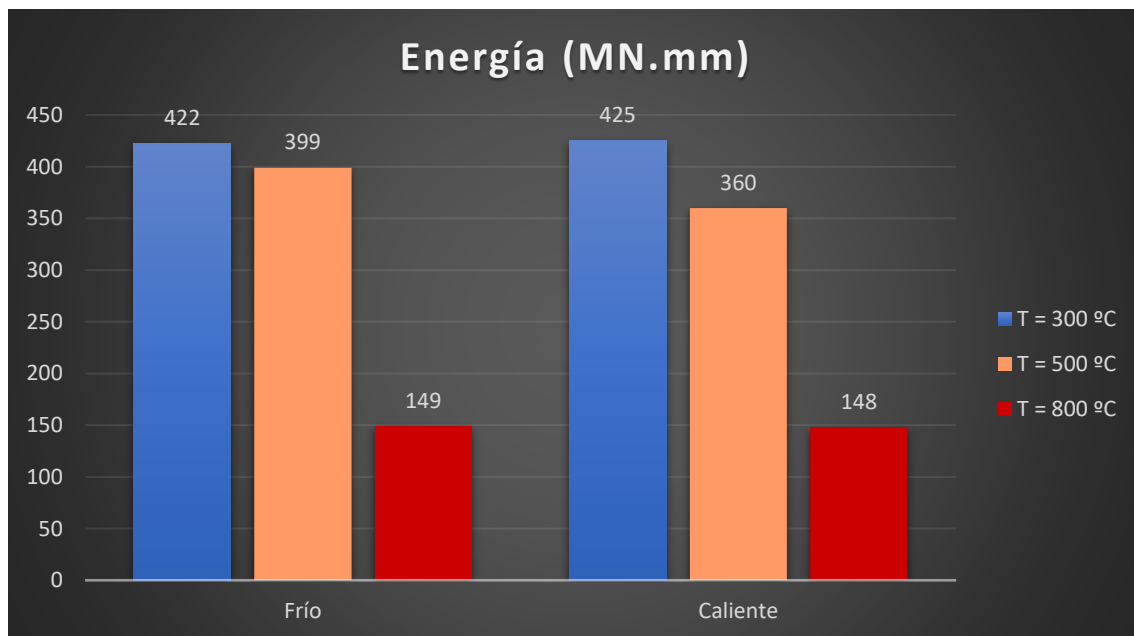
En segundo lugar, los valores de la deformación en frío son superiores a la deformación tibio y en caliente (ya se sabía).

Finalmente, los valores de *warm* y *hot* son iguales (se analizará en mayor profundidad en el punto posterior). Las ecuaciones de comportamiento son iguales y únicamente dependen del material escogido.

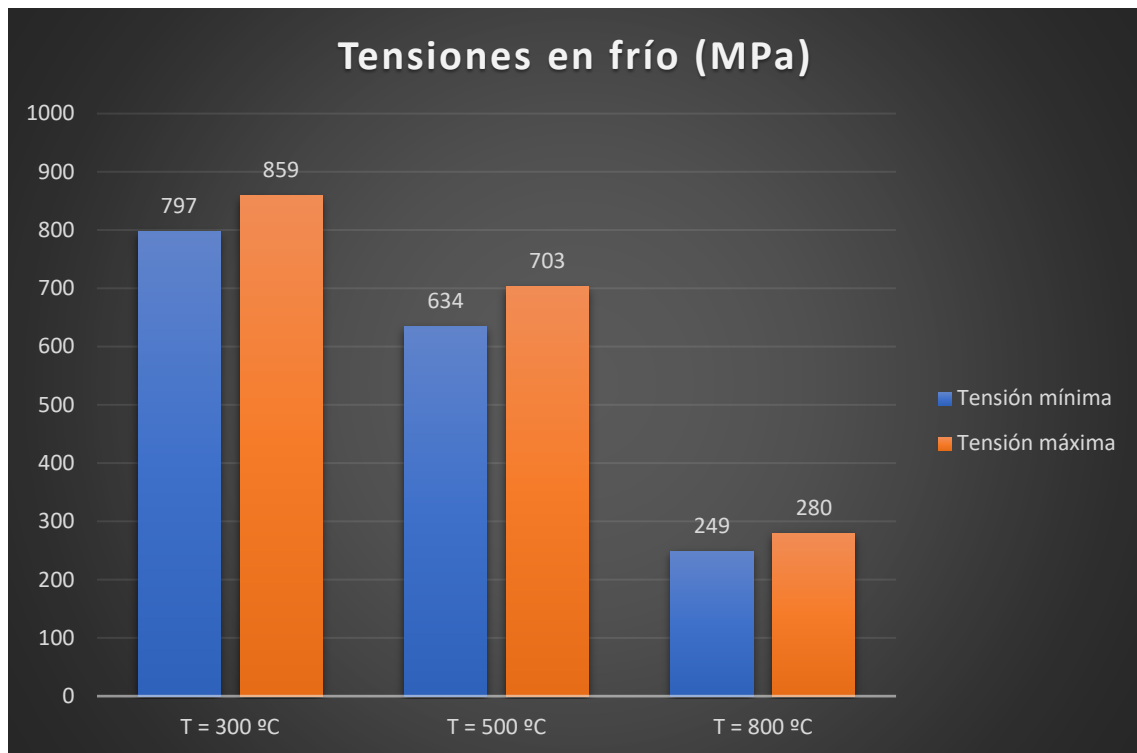
En base a ello, se profundizará en las diferencias encontradas según el conformado en frío y en caliente.



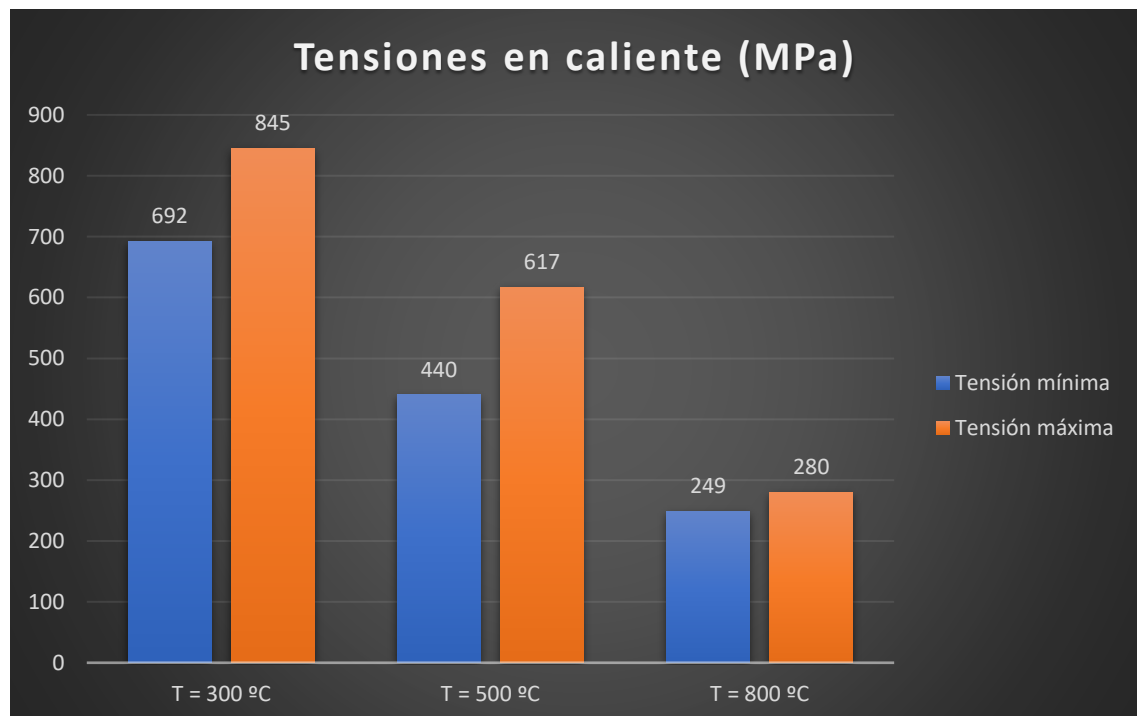
**Figura 7:** Variación de la carga entre frío y caliente para varias temperaturas.



**Figura 8:** Variación de la energía entre frío y caliente para varias temperaturas.



**Figura 9:** Diferencia entre la tensión máxima y mínima para varias temperaturas. Conformado en frío.



**Figura 10:** Diferencia entre la tensión máxima y mínima para varias temperaturas. Conformado en caliente.

## 6.2.2 Tensiones

Se pueden plasmar los valores de las dos anteriores tablas en la siguiente gráfica, para hacer la comparativa entre conformado en frío y en caliente y su influencia en la tensión:

**Tabla 7:** Variación de las tensiones entre frío y caliente para diferentes valores de temperatura.

Temperatura (°C)	Tensión máxima frío (MPa)	Tensión máxima caliente (MPa)	Tensión mínima frío (MPa)	Tensión mínima caliente (MPa)
300	859	845	797	692
500	703	617	634	440
800	<u>280</u>	<u>280</u>	<u>249</u>	<u>249</u>
2000	<u>1,48</u>	<u>1,48</u>	<u>1,48</u>	<u>1,48</u>

Por normal general los valores máximos de tensiones ocurren en el extremo de la pieza y las menores en el centro. A medida que se va elevando la temperatura el rango de presiones comienza a ser cada vez menor.

Esta distribución de tensiones, para valores acordes con la realidad, tiene su respuesta en la tercera Ley de Newton la cual cita: “*Si un objeto A ejerce una fuerza sobre un objeto B, entonces el objeto B debe ejercer una fuerza de igual magnitud en dirección opuesta sobre el objeto A*”. Se debe recordar que se ejerce un empuje o presión sobre la estampa superior (el objeto A correspondería a la estampa y el B a la preforma).

Para valores mayores como 1000 y 2000 °C, la distribución de tensiones ya no sigue ese patrón, debido a la cercanía con la temperatura de fusión y a la propia fusión del material, respectivamente. Según las imágenes en 3D mostradas por el programa después de la simulación. La pieza comienza a estar totalmente distorsionada.

Otro dato que cabe destacar es que para el valor más alto de temperatura analizado anteriormente ( $T = 800\text{ °C}$ ), los valores de tensión, tanto mínimo como máximo, son exactamente iguales. Esto nos lleva a pensar que cuando la temperatura comienza a ser elevada, la tensión deja de depender de este parámetro, también ocurre lo mismo con  $T = 2000\text{ °C}$ , aun habiéndose utilizado otro material.

Primero, vamos a analizar la temperatura final alcanzada según cada temperatura de conformado. En primer lugar, se mostrará en una tabla, que a medida que este parámetro aumenta, la diferencia entre ese valor y la temperatura máxima alcanzada comienza a ser cada vez menor; hasta que llegamos al caso límite donde se produce fusión donde la máxima temperatura alcanzada en la preforma jamás superará el valor de partida.

De este modo tenemos:

**Tabla 8:** Relación entre la temperatura máxima alcanzada y la temperatura de conformado.

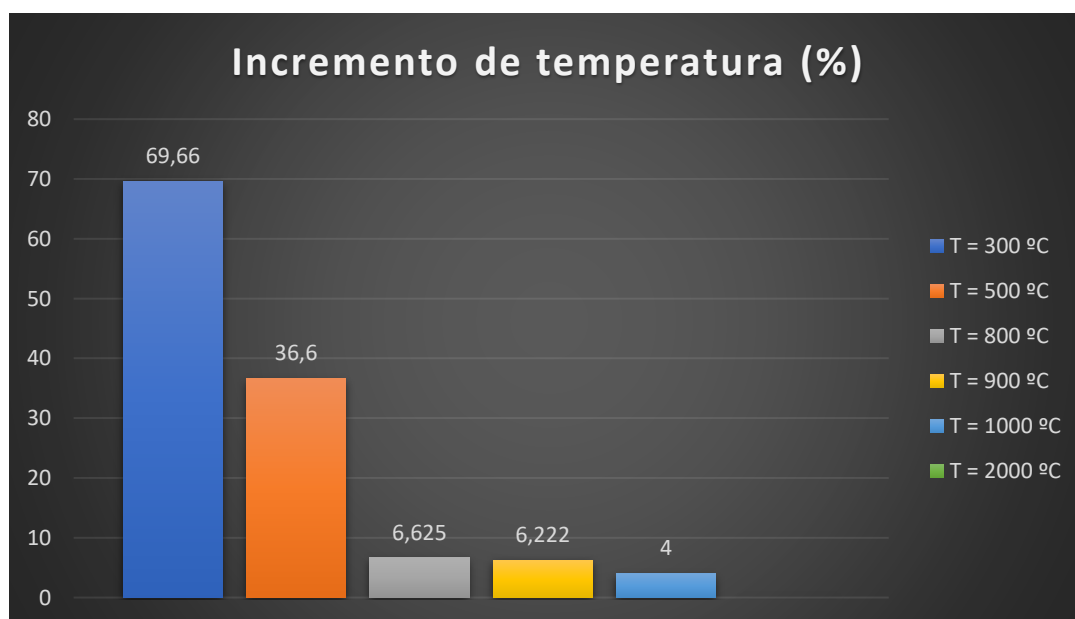
Temperatura de conformado (°C)	Temperatura máxima (°C)	ΔT (°C)
300	509	209
500	683	183
800	853	53
900	956	56
1000	1040	40
2000	2000	0

### 6.2.3 Temperatura

En segundo lugar, se calculará el incremento (en %) de temperatura respecto a la inicial, con la siguiente fórmula o por una sencilla regla de tres:

$$\frac{T_{\text{final}} - T_{\text{conformado}}}{T_{\text{conformado}}} \cdot 100$$

La gráfica quedará de la siguiente manera:



**Figura 11:** Incremento de temperatura para diferentes temperaturas de conformado.

**Tabla 9:** Porcentaje de incremento de la temperatura en diferentes piezas.

Temperatura de conformado (°C)	Temperatura máxima (°C)	Porcentaje de incremento (%)
300	509	69,66
500	683	36,6
800	853	6,625
900	956	6,222
1000	1040	4
2000	2000	0

Lo principal que se puede observar, es que de igual manera que ocurría con la diferencia de ambas temperaturas, es que a medida que aumenta la misma, el % disminuye, hasta llegar a la fusión del material donde el incremento de temperatura también es cero.

Asimismo, donde se observa el descenso más acusado del porcentaje es en  $T = 800\text{ °C}$ , donde nos situamos en el rango de trabajo en caliente y anteriormente se vio que en esta franja de temperaturas las tensiones máxima y mínima también se igualaban.

En último lugar, no sería malo recordar que los análisis de temperatura únicamente están hechos para *warm* y *hot* (en puntos previos se comprobó que daban los mismos resultados), ya que el conformado en frío siempre ocurre a temperatura constante, independientemente de la temperatura de partida.

#### 6.2.4 Valores extremos

En este subapartado, el objetivo será observar qué ocurre con los valores de casos que distan mucho de la realidad, es decir, para temperaturas imposibles en ese tipo de conformados, por ejemplo,  $T = 100\text{ °C}$  y  $T = 300\text{ °C}$  (el cual se vio anteriormente).

Es cierto que el programa siempre nos dará un resultado numérico, pero ¿ocurrirá lo mismo con los valores de tensiones para una temperatura muy elevada?

Se adjuntarán unas tablas resumen con todos los datos de los diferentes valores de temperatura y la diferencia que existe entre frío y caliente.

Para  $T = 300\text{ °C}$ :



**Tabla 10:** Variación de varios parámetros según el tipo de conformado para T = 300 °C.

Parámetros	Frío	Caliente	Diferencia entre frío y caliente
Carga (MN)	14,2	13,6	<b>0,6</b>
Energía (MN.mm)	422	425	<b>-3</b>
Tensión mínima (MPa)	797	692	<b>105</b>
Tensión máxima (MPa)	859	845	<b>14</b>
Rango de tensión (MPa)	62	153	<b>-91</b>
Temperatura máxima (°C)	300	509	<b>209</b>

Como se puede apreciar, el valor de la energía en el conformado en frío es superior al del conformado en caliente (aunque por muy poco). Probablemente, al ser un caso imposible, ya que a T = 300 °C no puede darse un conformado en tibio o en caliente, el programa haga cosas insólitas, por tratarse de valores que distan mucho de la realidad.

Analicemos pues, un valor aún más pequeño, T = 100 °C:

**Tabla 11:** Variación de varios parámetros según el tipo de conformado para T = 100 °C.

Parámetros	Frío	Caliente	Diferencia entre frío y caliente
Carga (MN)	15,1	14,9	<b>0,2</b>
Energía (MN.mm)	469	464	<b>5</b>
Tensión mínima (MPa)	913	818	<b>95</b>
Tensión máxima (MPa)	936	892	<b>44</b>
Rango de tensión (MPa)	23	74	<b>-51</b>
Temperatura máxima (°C)	100	394	<b>294</b>

Lo que se observa es que la diferencia de valores entre frío y caliente es cada vez menor para todos los parámetros, eso nos lleva plantearnos que los valores de *cold* y *hot* se acercan cada vez más a medida que nos alejamos de la realidad. Los parámetros en los cuales se ve más acusado este hecho son los de carga y energía; esto explica la razón de esa diferencia negativa para T = 300 °C.

Para T = 800 °C:

**Tabla 12:** Variación de varios parámetros según el tipo de conformado para T = 800 °C.

	Frío	Caliente	Diferencia entre frío y caliente
Carga (MN)	4,66	4,5	<b>0,16</b>
Energía (MN.mm)	149	148	<b>1</b>
Tensión mínima (MPa)	284	249	<b>35</b>
Tensión máxima (MPa)	300	280	<b>20</b>
Rango de tensión (MPa)	16	31	<b>15</b>
Temperatura máxima (°C)	800	853	<b>53</b>

De esta manera, la tabla resumen con la diferencia de valores entre frío y caliente, para diferentes temperaturas, será:

**Tabla 13:** Diferencia entre los valores del conformado en frío y en caliente.

	T = 300 °C	T = 100 °C	T = 800 °C
Carga (MN)	<b>0,6</b>	<b>0,2</b>	<b>0,16</b>
Energía (MN.mm)	<b>-3</b>	<b>5</b>	<b>1</b>
Tensión mínima (MPa)	<b>105</b>	<b>95</b>	<b>35</b>
Tensión máxima (MPa)	<b>-14</b>	<b>44</b>	<b>20</b>
Rango de tensión (MPa)	<b>-91</b>	<b>-51</b>	<b>15</b>
Temperatura máxima alcanzada (°C)	<b>209</b>	<b>294</b>	<b>53</b>

Por un lado, los diferentes valores no crecen a medida que lo hace la temperatura, existe un máximo (con estos datos no se puede afirmar cual es), pero la diferencia entre la temperatura de conformado y la máxima alcanzada decrece a razón del aumento paulatino de la temperatura, las diferentes condiciones que hagan que aumente más o menos se considerarán en otro punto.

Lo más importante que se debe recalcar, es que cuanto más nos alejemos de la realidad los valores entre el conformado en frío y en caliente son cada vez más pequeños (llegando a ser iguales en el caso extremo de que se produzca fusión). El programa nos va a dar un resultado numérico, que únicamente será cierto cuando introduzcamos parámetros que se puedan dar en la realidad.

De igual manera ocurría con la temperatura a medida que la elevemos más y más hasta llegar a la fusión la diferencia entre la temperatura de conformado y la máxima será cada vez más pequeña y los parámetros de tensión efectiva a temperaturas donde el material fundía eran muy cercanos a cero.

### 6.2.5 Transferencia de calor

La transferencia de calor en la pieza no será objeto de estudio, ya que en este análisis no se produce ningún tipo de impacto sobre la pieza. Simplemente, ocurre un intercambio de transferencia de calor entre dos sistemas con diferentes temperaturas (el ambiente y la pieza de trabajo) y todo ello tiene lugar en un instante de tiempo  $t$ .

Al no haber impacto, no habrá variación de velocidad, ni de presión, ni tampoco se producirá variación de la geometría, siendo el único parámetro relevante la temperatura final de la pieza, y la variación en forma de calor producida.

Si la temperatura ambiente es mayor que la de la pieza, se calentará transcurrido el tiempo que dure el proceso, como meter la pieza en un horno. De forma contraria, si la pieza está más caliente que el ambiente, se enfriará a razón de la temperatura ambiente.

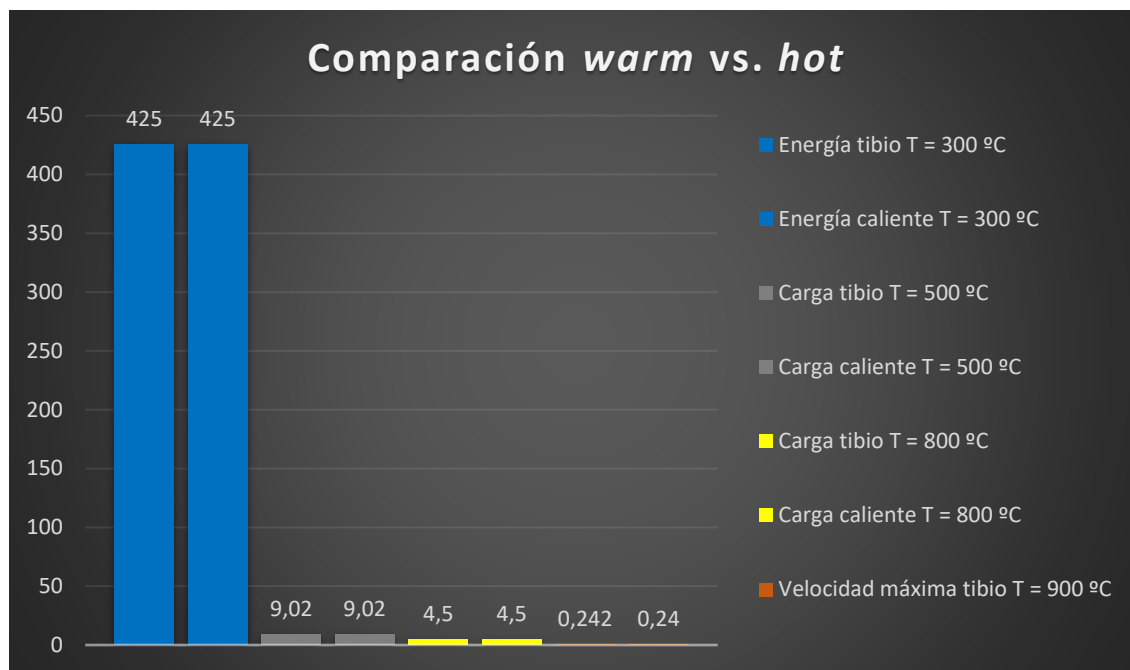
Se podrán dar dos casos extremos. Si  $t = 0$  s, no se producirá intercambio alguno de calor, y si  $t$  es suficientemente elevado, llegará un punto que las temperaturas de ambos cuerpos se igualarán y  $T_{\text{amb}} = T_{\text{pieza}}$  cuando  $t = \infty$ .

## 6.3 Conformado en tibio y en caliente. Diferencias encontradas

En este apartado, nos centraremos en las diferencias encontradas entre el conformado en tibio y en caliente para un mismo valor de temperatura. Se analizarán distintos parámetros, como la energía, la carga, el valor máximo de velocidad alcanzado en un punto de la pieza, o bien los valores de tensión efectiva.

Se utilizarán las siguientes temperaturas de conformado para el estudio: 300, 500, 800, 900, 1000 y 2000 °C (esto es, cuando se ha producido la fusión del material).

No importa que una temperatura en concreto pertenezca a la franja de frío, de caliente o de tibio, únicamente se pretende observar las diferencias entre *warm* y *hot* para una misma temperatura, haya recristalización o no.



**Figura 12:** Comparación entre el conformado en tibio y en caliente para varios parámetros.

Otros valores que también se han tenido en cuenta para el estudio, se mostrarán en la siguiente tabla junto con los anteriores:

**Tabla 14:** Comparación entre el conformado en tibio y en caliente de otros parámetros.

Temperatura (°C)	Parámetros	Tibio	Caliente
300	Carga (MN)	13,6	13,6
	Energía (MN.mm)	425	425
500	Carga (MN)	9,02	9,02
	Energía (MN.mm)	360	360
800	Carga (MN)	4,5	4,5
	Energía (MN.mm)	148	148
900	Velocidad máxima (m/s)	0,242	0,240
	Velocidad mínima (m/s)	0,121	0,120
1000	Tensión máxima (MPa)	153	153
	Tensión mínima (MPa)	135	135

Como se puede comprobar, los resultados son iguales (salvo la velocidad en  $T = 900\text{ °C}$  donde la diferencia es prácticamente inapreciable). Tanto en tibio como en caliente se utiliza el

mismo material. Las propiedades mecánicas del material son las mismas y con los parámetros desde los que partimos *warm* y *hot* dan lugar a los mismos resultados.

Esta diferencia de velocidad no llega ni al 1 %, así que se puede concluir, sin lugar a dudas, que los resultados obtenidos tanto en *warm* como en *hot* son iguales (con las condiciones fijas que se han seleccionado en el programa). Sin embargo, en la deformación en frío, aunque también hemos utilizado el mismo acero, sus propiedades mecánicas son diferentes.

Estas son las propiedades del acero escogido AISI-1045 (20-1100 °C).

**Tabla 15:** Propiedades mecánicas del acero AISI-1045 (20-1100 °C).

Propiedades	Tibio	Caliente
Tasa de deformación	0-1	0-1
Deformación	1,6-40	1,6-40
Temperatura	20-1370 °C	20-1370 °C
Módulo de Young	20-1200	20-1200
Coefficiente de Poisson	Constante	Constante
Dilatación térmica	Temperatura = 93,95-815,556 °C	Temperatura = 93,95-815,556 °C
Conductividad térmica	Temperatura = 100 - 1485 °C	Temperatura = 100 - 1485 °C
Capacidad calorífica	Temperatura = 100 - 1485 °C	Temperatura = 100 - 1485 °C

Por consiguiente, se concluye que no existe diferencia entre el conformado en tibio y en caliente, por lo tanto, a partir de ahora podremos hablar simplemente de deformación en frío y en caliente.

## 6.4 Propiedades mecánicas del material

Por otra parte, se había comprobado que no existía diferencia apreciable entre la deformación en tibio y en caliente a la misma temperatura, es decir, no había ningún cambio aparente en las propiedades finales del material tras el proceso de forjado, puesto que las propiedades del material eran las mismas.

Como conclusión, se obtiene que el cambio de las propiedades del material depende única y exclusivamente del material y no de la recrystalización.

**Tabla 16:** Comparación de propiedades del mismo acero con diferentes rangos de temperatura.

Propiedades	AISI-1045 COLD (20 °C)	AISI-1045 (20-1100 °C)
Tasa de deformación	0-2	0-1
Deformación	1,5-100	1,6-40
Rangos de temperatura aplicables	20 °C	20-1370 °C
Módulo de Young	Constante	20-1200
Coeficiente de Poisson	Constante	Constante
Dilatación térmica	Constante	Temperatura = 93,33-815,556 °C
Conductividad térmica	Temperatura = 100-1485 °C	Temperatura = 100-1485 °C
Capacidad calorífica	Temperatura = 100-1485 °C	Temperatura = 100-1485 °C

Las propiedades de ambos materiales no son iguales, ¿producirán resultados diferentes igualmente? Si se confirma esta hipótesis, queda demostrado que con las mismas condiciones, temperatura e incluso tipo de conformado, si las propiedades mecánicas del material son diferentes, los resultados serán también distintos. Ello nos lleva a recalcar, el por qué con el mismo material se producían los mismos resultados en la deformación en tibio y en caliente.

Resultados obtenidos:

**Tabla 17:** Comparación de resultados del mismo acero con diferentes rangos de temperatura.

Resultados	AISI-1045 (20 °C)	AISI-1045 (20-1100 °C)
Rango de tensión efectiva (MPa)	883-907	977-990
Rango de velocidad (m/s)	0,262-0,164	0,260-0,162
Carga (MN)	14,6	14
Energía (MN.mm)	447	504

Como se puede apreciar los resultados varían entre sí, debido a que rangos de temperatura distintos darán lugar a propiedades mecánicas diferentes. Como conclusión, se puede asegurar de leyes de comportamiento diferentes, darán lugar a resultados diferentes.

## 6.5 Ecuaciones de comportamiento

En este apartado se profundizará sobre los conceptos explicados en el punto anterior. Para ello se analizarán 4 casos con el mismo material (pero con rango de temperaturas diferentes), mismo tipo de conformado e igual temperatura y por otro lado, el mismo material con igual rango, mismo tipo de conformado, pero variando esa temperatura seleccionada.

A continuación, se numerarán los casos a analizar, se plasmarán los resultados en una tabla y se comentarán los resultados.

- Conformado en frío  $T = 20\text{ °C}$  AISI-1045 *COLD* (20 °C).
- Conformado en frío  $T = 20\text{ °C}$  AISI-1045 *COLD* (20-1100 °C).
- Conformado en caliente  $T = 20\text{ °C}$  AISI-1045 *COLD* (20 °C).

**Tabla 18:** Resultados variando el rango de temperatura del material y el tipo de conformado.

Tipo de material	AISI-1045 <i>COLD</i> (20 °C)	AISI-1045 <i>COLD</i> (20-1100 °C)	AISI-1045 <i>COLD</i> (20 °C)
Tipo de conformado	<u>Frío</u>	<u>Frío</u>	<u>Caliente</u>
Temperatura elegida (°C)	20	20	20
Carga (MN)	14,6	15,1	Nos encontramos ante un caso imposible de realizar en el Deform-3D.
Energía (MN.mm)	447	469	
Rango de tensión (MPa)	833-907	913-936	
Rango de velocidad (m/s)	0,164-0,262	0,265-0,166	
Temperatura máxima (°C)	20	20	

El último no sólo es imposible por la temperatura, sino porque ese material es únicamente para trabajo en frío y no aparece en la biblioteca cuando el trabajo es en tibio o caliente.

Más casos imposibles, los cuales son:

- Conformado en frío  $T = 21\text{ °C}$  AISI-1045 *COLD* (20 °C).
- Conformado en frío  $T = 300\text{ °C}$  AISI-1045 *COLD* (20 °C).
- Conformado en frío  $T = 500\text{ °C}$  AISI-1045 *COLD* (20 °C).

**Tabla 19:** Análisis de casos imposibles.

<b>Tipo de material</b>	<b>AISI-1045 <i>COLD</i> (20 °C)</b>	<b>AISI-1045 <i>COLD</i> (20 °C)</b>	<b>AISI-1045 <i>COLD</i> (20 °C)</b>
<b>Tipo de conformado</b>	<b><u>Frío</u></b>	<b><u>Frío</u></b>	<b><u>Frío</u></b>
<b>Temperatura elegida</b>	<b>21</b>	<b>300</b>	<b>500</b>
Carga (MN)	14,6	14,6	14,6
Energía (MN.mm)	447	447	447
Rango de tensiones (MPa)	833-907	833-907	833-907
Rango de velocidad (m/s)	0,164-0,262	0,164-0,262	0,164-0,262
Temperatura máxima (°C)	21	300	500

Las conclusiones obtenidas se numerarán entonces:

Aunque la pieza se encuentre a la misma temperatura y se le aplique el mismo conformado, como el material es diferente (ya que el rango de temperatura lo es) sus propiedades son diferentes y sus ecuaciones de comportamiento también lo son. Es por este motivo que los resultados no serán iguales.

Para los tres casos imposibles (por los valores de temperatura elegidos) los resultados de todos los parámetros son iguales. Cuando se utilizaba un material con conformado en tibio o en caliente (donde existía un rango amplio de temperaturas) esto no ocurría y a diferentes temperaturas y tipo de conformado para el mismo material, sí había cambio de propiedades.

Partiendo de los mismos datos (presión, velocidad de empuje, carrera...) los parámetros a tener en cuenta serán el material, la temperatura seleccionada y el tipo de conformado.

Pueden darse dos casos y están son las conclusiones obtenidas:

Si el material es de tipo *COLD* ( $T = \text{cte}$ ) los resultados obtenidos dependen exclusivamente del material escogido, pero la temperatura máxima siempre será la temperatura elegida (y por supuesto, constante).

Por el contrario, si el material posee un rango de posibles temperaturas ( $T \neq \text{cte}$ ) los resultados dependen del material, de la temperatura del proceso y del tipo de conformado (frío, tibio/caliente).



## 6.6 Recristalización

Las operaciones de deformación plástica de los metales y aleaciones a menudo se realizan a temperaturas superiores a la temperatura de recristalización (pero inferiores a la de fusión) en el proceso denominado **deformación en caliente**. La recristalización restaura las propiedades que tenía la pieza antes de la deformación por endurecimiento.

Este proceso depende fundamentalmente del tiempo y de la temperatura. La **recristalización** siempre aumenta con la temperatura y con el tiempo.

El rango de trabajado en caliente está comprendido entre la temperatura de recristalización y la de fusión del metal.

Como se mencionó en el segundo apartado, con  $T = 0,5 \cdot T_{\text{fusión}}$  hay recristalización, por lo tanto, suponemos que cuando se realiza el conformado en tibio o en caliente por encima de esa temperatura, siempre hay recristalización.

¿Qué afecta en las propiedades mecánicas que haya recristalización o no? O por el contrario, ¿habrá diferencia en la temperatura final que se alcanza?

La recristalización depende de la temperatura, pero también del tiempo que dura el proceso. En los análisis en tibio y caliente, el tiempo que dura el proceso no es un factor que hayamos tenido en cuenta, es decir, según las condiciones introducidas y la temperatura a la que se realice el forjado, se tardará un tiempo determinado fijado por el Deform-3D.

¿Se repartirá de manera diferente los rangos de temperatura de la pieza por haber o no recristalización?, ¿será más notorio a mayor rango de temperatura?, ¿qué se observará a nivel interno en el programa, y a nivel externo en la pieza?

La recristalización se produce a nivel interno dentro del programa cuando la temperatura elegida supera el 50 % de la temperatura de fusión, pero no es algo que se pueda apreciar en los resultados con los parámetros modificados en el Deform-3D. En consecuencia, no es un factor a tener en cuenta.

Ya se vio en el anterior apartado las características que influían a la hora de variar los resultados. Cada material presenta unas ecuaciones de comportamiento diferentes y estas características, junto con otros valores seleccionados harán que varíen los resultados (el tipo de herramienta, el empuje aplicado o la carrera, entre otros).

Por lo tanto, con los parámetros que estamos modificando la recristalización no es una variable para tomar en consideración.

## 6.7 Conformado a temperatura de fusión

La **fusión** ocurre cuando aumenta la energía interna de los sólidos, típicamente por la aplicación de calor o presión, el cual aumenta la temperatura de la sustancia al punto de fusión. En el punto de fusión, el orden de iones o moléculas en los sólidos se devienen a un estado menos

ordenado, y el sólido se convierte en un líquido. Cada material tiene diferentes puntos de fusión y no debemos superar esa temperatura.

Si se produjera la fusión de un elemento, se produciría un cambio de estado, y se hablaría de un proceso de fundición. El material pasaría de sólido a líquido. En la práctica, se utilizan temperaturas elevadas, pero no tanto como para provocar la fusión del material (entre  $0,7 T_m$  y  $0,9 T_m$ ).

La fusión se produce cuando se le aplica una temperatura a un material considerablemente mayor que el punto de fusión del material en cuestión. Este proceso se define como el paso del estado sólido al estado líquido, por medio de la aplicación de calor.

Por lo tanto, ¿qué ocurriría a nivel interno en el programa?, ¿cómo se reflejaría este cambio de estado en los resultados?, ¿qué pasaría con la temperatura?

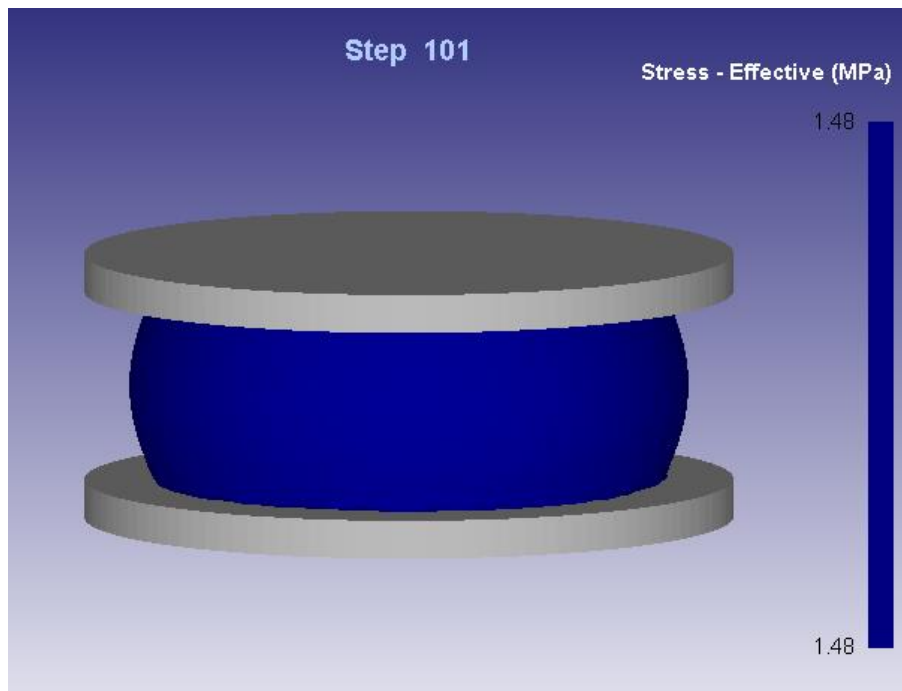
Como se puede apreciar, la conclusión a la que se llega, además de que la pieza tiene una forma irregular después del proceso y los rangos de tensiones no siguen el comportamiento esperado, es que la temperatura final alcanzada es la misma temperatura que la de conformado, es decir, la temperatura jamás podrá ser mayor que la de fusión. Tanto en frío, tibio o caliente la temperatura final será constante.

La temperatura final de la pieza en ningún caso supera la temperatura a la que ocurre el proceso, puesto que ha habido fusión del material. El proceso de forjado ocurre en una pieza en estado sólido, donde tiene lugar un proceso de compresión entre dos estampas.

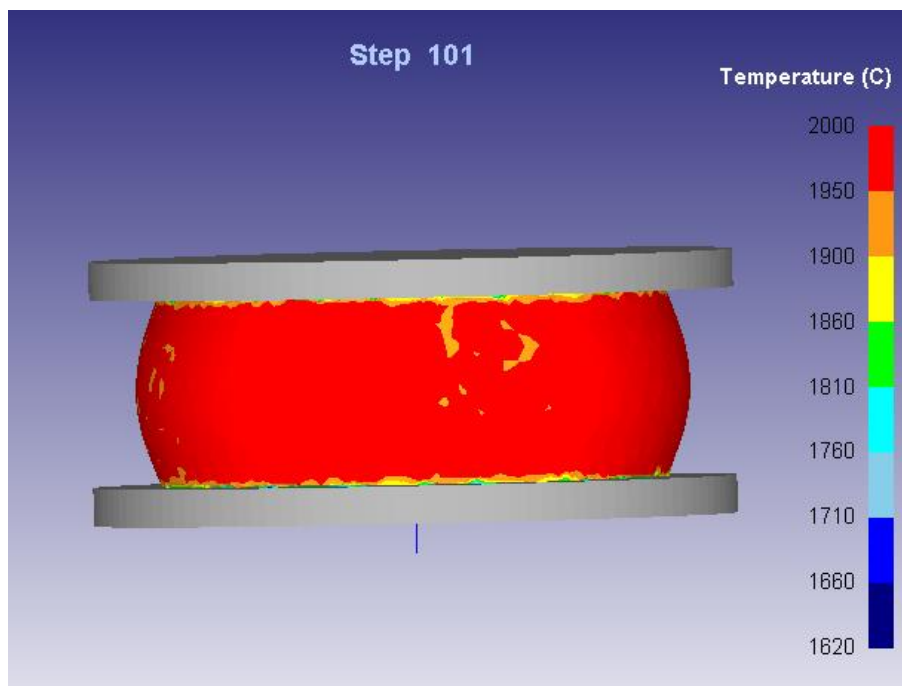
La energía interna almacenada en la pieza ya no es la debida al trabajo de la forja y a la temperatura exterior, ahora únicamente esa energía interna se manifiesta como un aumento de la temperatura (calor suministrado en un sistema rígido, es decir, a volumen constante).

Por ejemplo, en una olla de agua hirviendo, si aplicamos calor a 100 grados, comenzará a evaporarse cuando el líquido alcance esa temperatura, sin embargo, el agua hirviendo nunca podrá superar esa temperatura, a menos que se aplique energía de otro modo, entre otros, en forma de trabajo.

Estos son los valores para una temperatura de 2000 °C (la temperatura de fusión es de 1100 °C):



**Figura 13:** Tensiones finales en una pieza sometida a un proceso de fusión a 2000 °C.



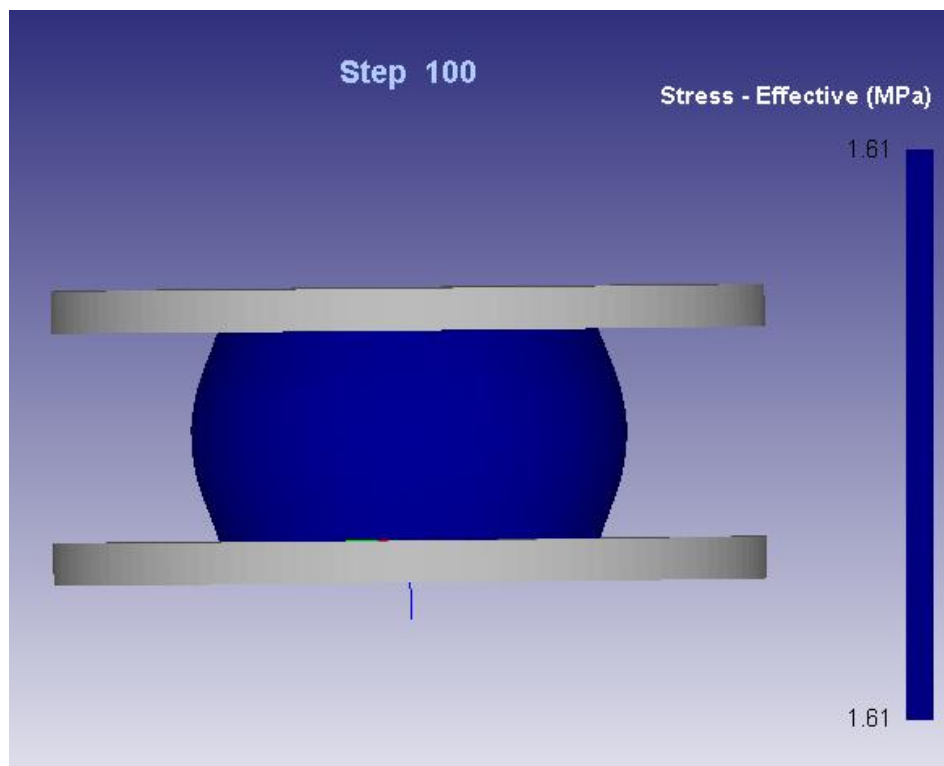
**Figura 14:** Temperatura final de una pieza sometida a un proceso de fusión a 2000 °C.

La temperatura no llega en todos los puntos a 2000 °C, pero tampoco los supera y el valor de presión es realmente muy bajo (esto se explica porque la pieza final está en estado líquido), debido a que los sólidos y los líquidos son especialmente sensibles a los cambios de presión. De igual

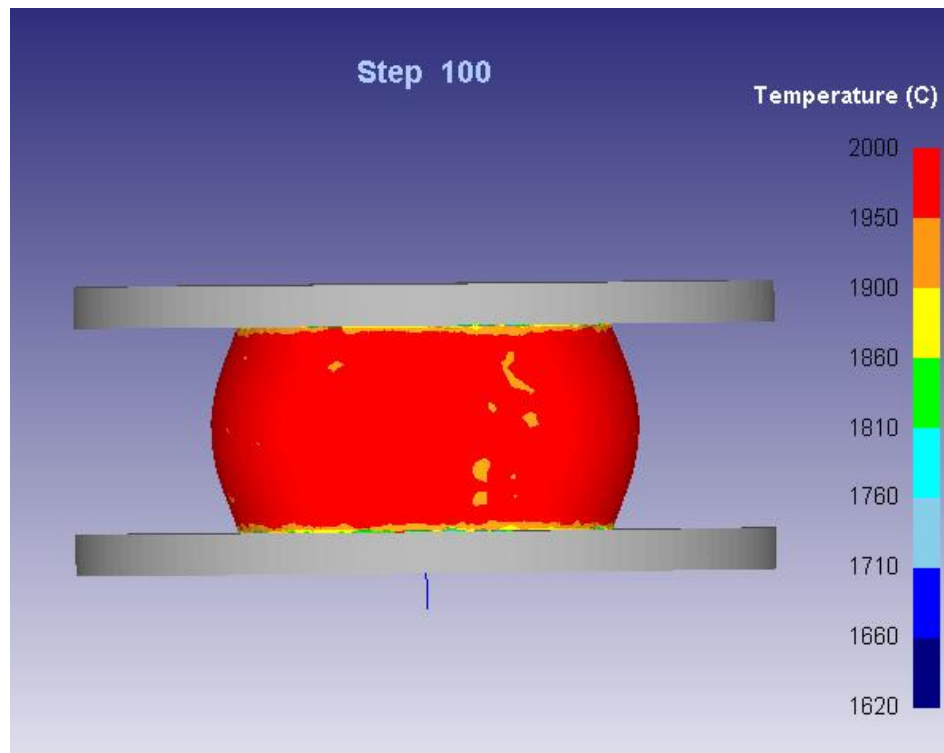
manera, la pieza ya no sigue ningún patrón de deformación, simplemente nos ofrece un resultado, pero se sabe a ciencia cierta, que no se acerca a la realidad.

Cuando un material se encuentra en estado líquido, la presión es menor que la de ese mismo material en estado sólido, debido a que en un sólido esa presión conlleva que aumenten las fuerzas de cohesión entre las partículas y el acercamiento entre ellas. En cambio, un material en estado líquido, sólo se mantendrá compacto cuando se introduce en un recipiente que le de forma.

A continuación, se ejemplificará otra pieza distinta a 2000 °C, pero con  $D = 70$  mm de preforma, y la temperatura de fusión del material es 1200 °C.



**Figura 15:** Tensiones finales en una segunda pieza sometida a un proceso de fusión.



**Figura 16:** Temperatura final de una segunda pieza sometida a un proceso de fusión.

## 6.8 Cambio del tipo de herramienta utilizada

En este apartado se analizarán algunas comparaciones con distintas herramientas, relacionándolo con otros casos ya vistos para confirmar algunas de las conclusiones vistas anteriormente y para ver la evolución de los parámetros aplicando un golpe.

En primer lugar, se mencionarán las herramientas utilizadas y sus diferentes características. Las comparaciones se realizarán con los modelos del punto 3.2 en los que se analizaban 3 temperaturas diferentes:  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  *cold*,  $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  *warm* y  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  *hot*, con un empuje de 200 mm/s.

Golpe de martillo a 6000 lb:

- Eficiencia = 0,45 (0-1)
- Masa =  $2,7193\text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{mm}$
- Energía =  $8,641\text{ MN}\cdot\text{mm}$

Golpe de martillo a 2000 lb:

- Eficiencia = 0,45 (0-1)
- Masa =  $0,9064\text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{mm}$
- Energía =  $1,373\text{ MN}\cdot\text{mm}$

Empuje de una prensa hidráulica:

- Velocidad = 200 mm/s

Golpe de prensa mecánica a 6000 lb:

- Carrera total = 457,2 mm
- Ratio carrera/segundos = 0,6333

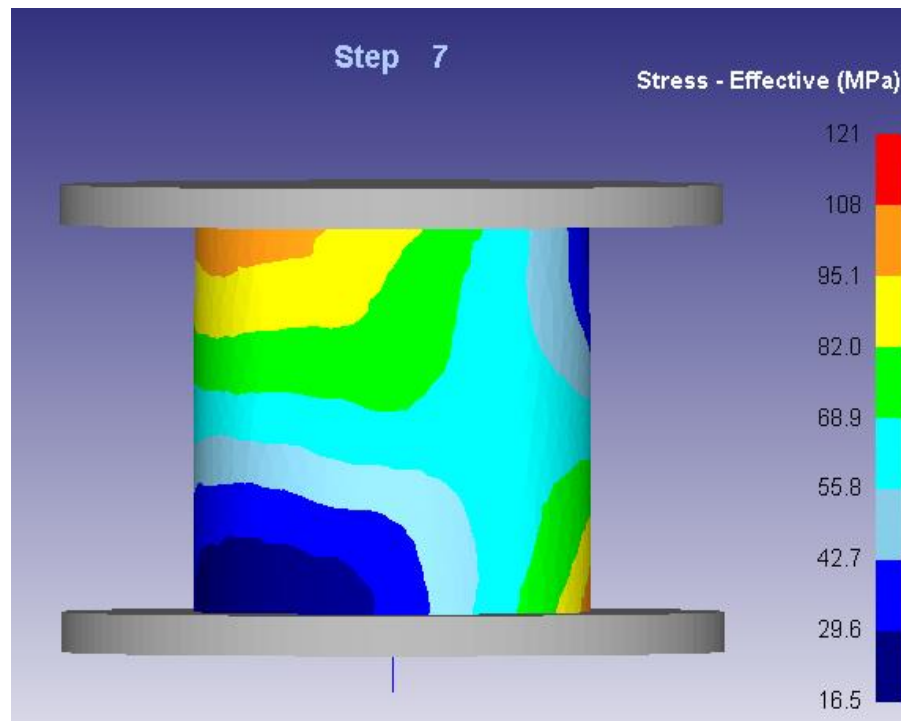
Se analizarán el número de pasos, la tensión para los valores de conformado en frío y, por último, el incremento de temperatura.

### 6.8.1 Tensiones

En este subapartado, se volverá a confirmar que para el conformado en frío a temperatura ambiente (independientemente de la herramienta utilizada), los valores de tensión no seguirán el mismo patrón que habitualmente, bien porque sean constantes, o bien por la distribución de los mismos.

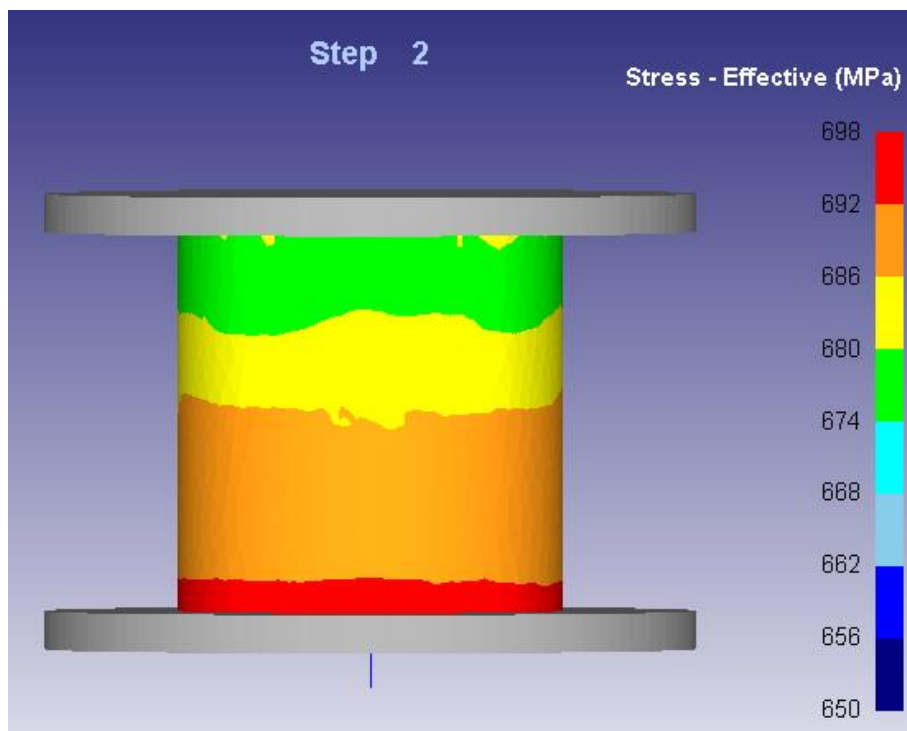
Veámoslo:

En primer lugar, para el golpe de martillo de 6000 de fuerza la distribución de tensiones sigue un parámetro irregular. Se adjunta imagen en 3D.



**Figura 17:** Distribución de tensiones mediante un golpe de martillo a 6000 lb.

Por otra parte, para el martillo a 2000 lb el rango de tensiones es muy pequeño y las mayores tensiones se originan en la parte inferior del material.



**Figura 18:** Distribución de tensiones mediante un golpe de martillo a 2000 lb.

Por último, pero no por ello menos importante, para la prensa mecánica apenas existe tampoco variación en los valores de tensión.

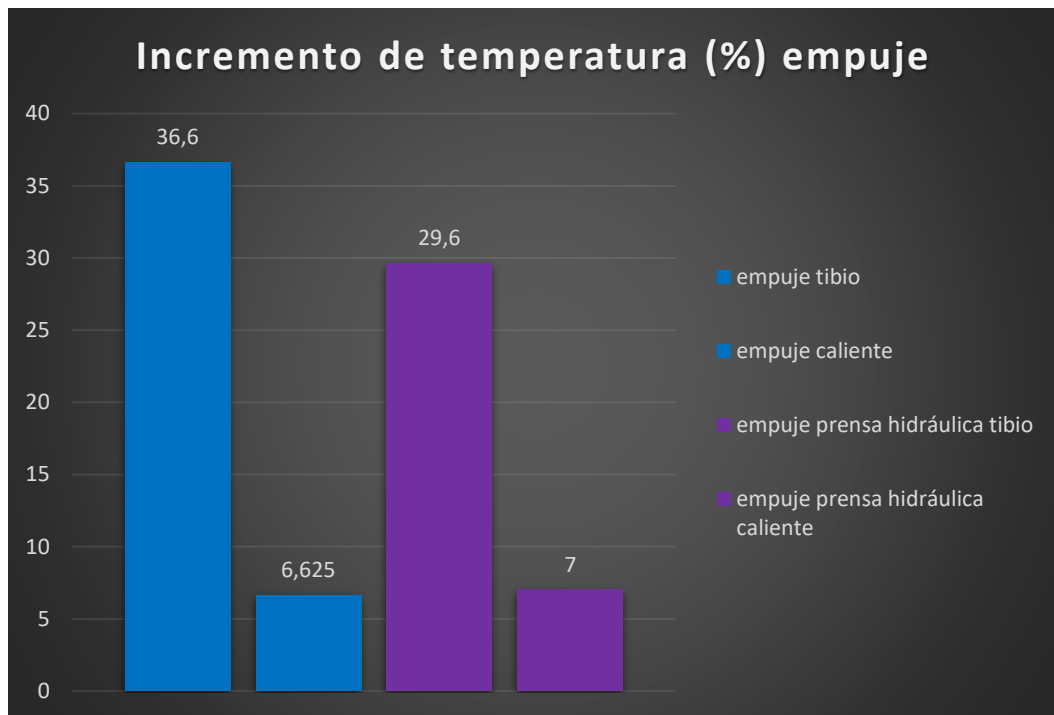
Seguidamente, se adjuntará una tabla con el resumen de los valores obtenidos para cada uno de los diferentes casos estudiados.

**Tabla 20:** Resumen de las tensiones obtenidas con diferentes herramientas y fuerzas.

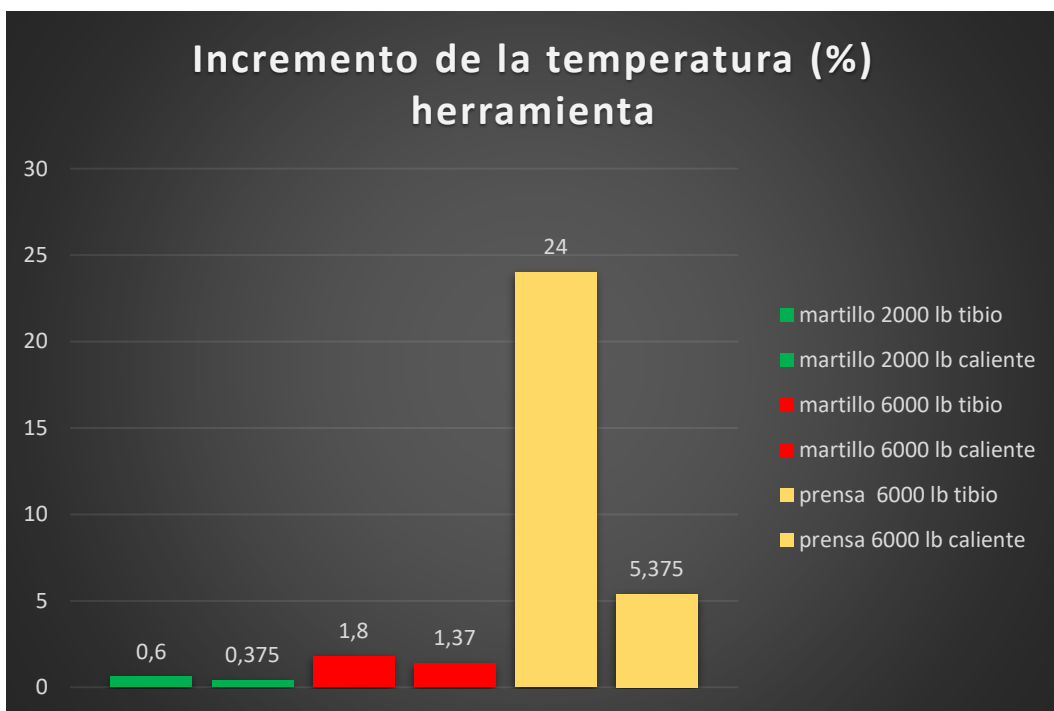
Herramienta	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Rango de tensiones (MPa)
Martillo 2000 lb	674	698	24
Martillo 6000 lb	16,5	121	104,5
Prensa mecánica 6000 lb	955	984	29

### 6.8.2 Temperatura

¿Existirá alguna diferencia notoria entre la temperatura máxima alcanzada por una herramienta y algún otro parámetro?



**Figura 19:** Incremento de temperatura para varios casos realizados con velocidad de empuje.



**Figura 20:** Incremento de temperatura producido para varios casos realizados con herramientas.

Como se puede apreciar, la temperatura final alcanzada es mucho mayor cuando se realiza un empuje a velocidad constante o con el empuje de una prensa hidráulica a la misma velocidad.



En cambio, para el golpe del martillo el porcentaje de incremento es muy bajo (por lo que la temperatura máxima alcanzada será muy similar a la de conformado), este peculiar hecho podría estar relacionado con la acusada disminución del número de pasos.

Para la prensa mecánica, con mayor número de pasos, el incremento de temperatura es mucho mayor, aunque menor que en los valores de referencia del empuje.

### 6.8.3 Número de pasos

En este apartado sí se analizarán el número de pasos de las distintas herramientas para estudiar con qué parámetro se relaciona esta disminución.

**Tabla 21:** Análisis del número de pasos para empuje y herramienta.

Manera de efectuar el forjado	Tipo de herramienta o velocidad	Frío	Tibio	Caliente
Empuje	0,2 m/s	100	100	100
Herramienta	Martillo 6000 lb	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>16</b>
	Martillo 2000 lb	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>6</b>
	Prensa mecánica 6000 lb	<b>100</b>	<b>81</b>	<b>100</b>

Es muy sencillo darnos cuenta de que al usar una herramienta concreta con unas características definidas, el número de pasos es mucho menor que al aplicar una velocidad constante para efectuar el proceso de forja. ¿Por qué ocurre esto?

Debido a que el proceso se para, bien porque la herramienta se queda sin potencia a mitad del proceso o porque los parámetros introducidos no son realistas para poder llevarlos a cabo con esa herramienta.

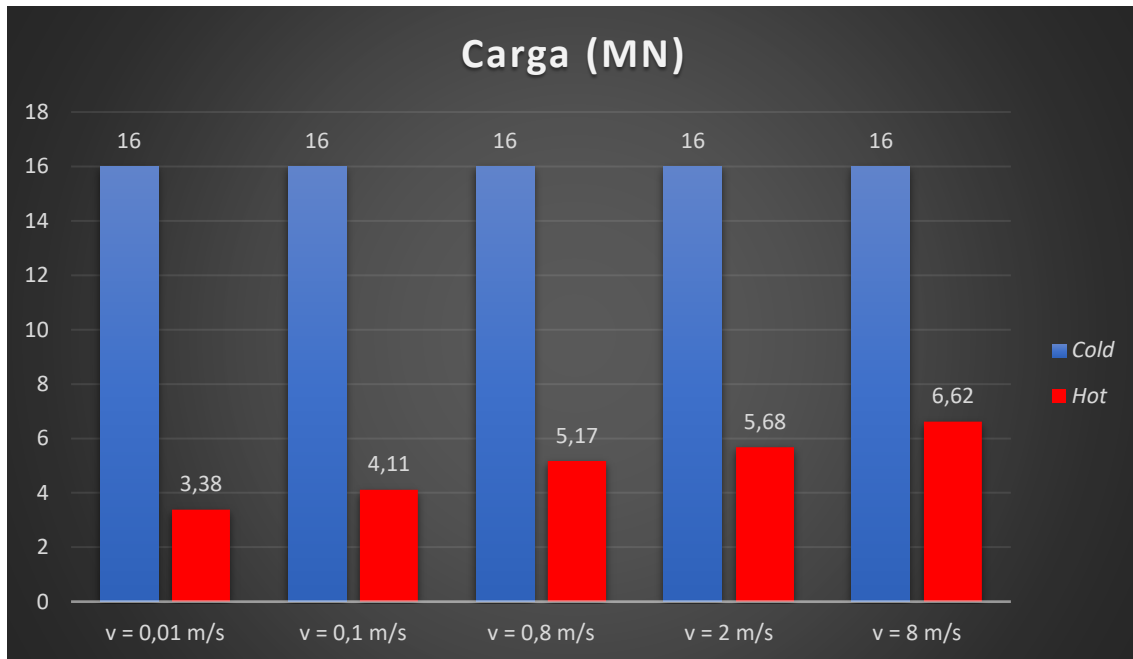
Cuando se escoge una herramienta esta ya posee unas características predeterminadas y estandarizadas como un valor de rendimiento, una energía que puede alcanzar o la propia masa, es muy diferente a cuando se le aplica un empuje de valor contante a cierta velocidad.

Por último, con el martillo de 2000 lb el número de pasos es menor que el mismo a 6000 lb, por lo dicho anteriormente. Por el contrario, la prensa mecánica tiene otras características muy diferentes.

## 6.9 Variación de la velocidad de empuje de la herramienta

Para este apartado se analizarán los resultados cuando se varía la velocidad de empuje en la preforma para un material y temperatura determinados. El material es AISI-1045 (20-1100 °C) y la temperatura seleccionada será de 800 °C. Los tipos de conformados serán en frío y caliente.

### 6.9.1 Carga



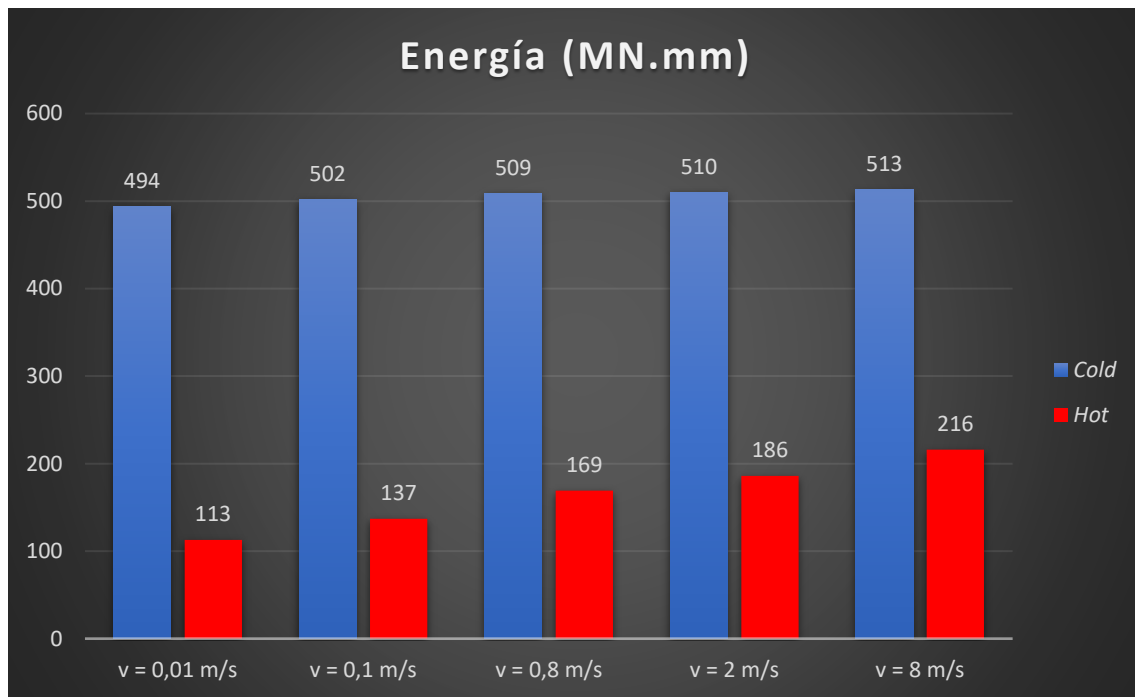
**Figura 21:** Variación de la carga con diferentes velocidades de empuje.

A simple vista se aprecia que, a temperatura constante, la variación de la velocidad de empuje no afecta a la carga.

Por lo tanto, la carga a temperatura constante no depende de la velocidad de empuje, pero sí de la temperatura (por eso varían levemente los resultados en el conformado en caliente).

### 6.9.2 Energía

De manera similar a lo que ocurría con la carga, las mayores variaciones se producen en el conformado en caliente, pero no es un parámetro que se vea muy modificado con la variación del empuje. Los resultados se plasmarán en la siguiente tabla y gráfica:



**Figura 22:** Variación de la energía con diferentes velocidades de empuje.

**Tabla 22:** Rango de valores entre la velocidad mínima y máxima de empuje escogida.

Rango de valores entre la velocidad máxima y la mínima escogida	Frío	Caliente
Carga (MN)	0	3,24
Energía (MN.mm)	19	103

Los valores del conformado en frío se ven poco afectados por los cambios de empuje, es decir, que si el objetivo de un proceso de forjado fuera el aumento final de la carga o la energía interna de la pieza no sería nada conveniente gastar recursos aumentando la velocidad de empuje (a temperatura constante).

### 6.9.3 Velocidad

¿La velocidad aumentará siempre de manera lineal o tiene un tope a partir del cual los resultados varíen de forma diferente? Se han seleccionado 5 diferentes velocidades de empuje, una de las cuales representa un caso muy extremo para tratarse de una forja. Para el empuje de 8 m/s la velocidad sigue creciendo, pero el patrón en 3D comienza a ser más irregular.

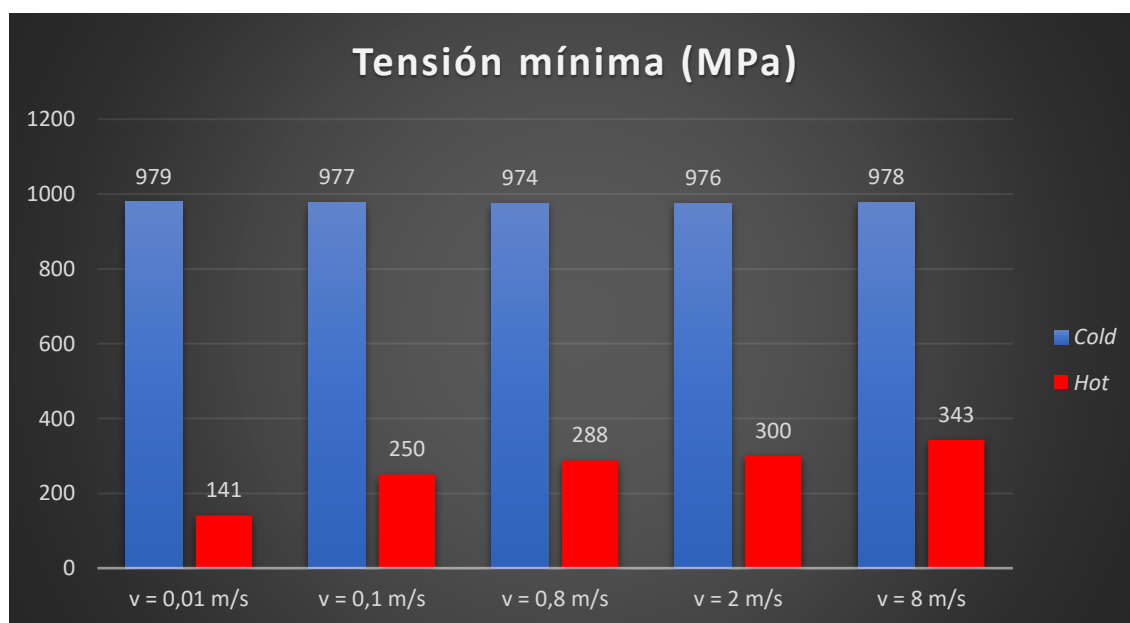
**Tabla 23:** Comparación de la velocidad adquirida en el proceso según la velocidad de empuje.

Velocidad del empuje (m/s)	Frío		Caliente	
	Velocidad mínima alcanzada (m/s)	Velocidad máxima alcanzada (m/s)	Velocidad mínima alcanzada (m/s)	Velocidad máxima alcanzada (m/s)
0,01	0,00847	0,0135	0,00405	0,00942
0,1	0,0818	0,131	0,0437	0,116
0,8	0,511	1,02	0,482	0,962
2	1,27	2,54	1,21	2,42
8	5,08	10,2	4,85	9,69

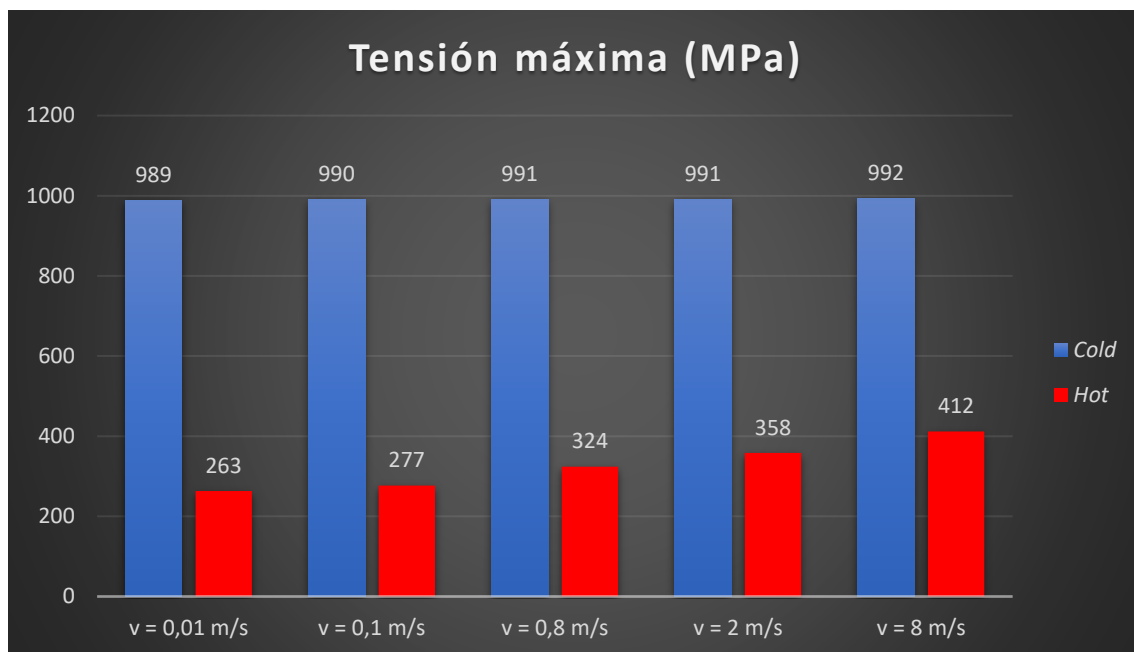
Con todos estos datos se puede afirmar que existe una relación directa entre la velocidad de empuje aplicada y la velocidad adquirida en la pieza después del forjado. La variación de la velocidad afecta prácticamente solo a la velocidad final, cuestión lógica, a la vez que no existe ningún tope donde la velocidad sea máxima.

Aunque en la realidad la pieza no pudiera soportar un empuje excesivo y se rompiera, el programa siempre dará un resultado numérico, donde la velocidad aumenta de manera lineal con el empuje independientemente del tipo de conformado.

#### 6.9.4 Tensiones



**Figura 23:** Variación de la tensión mínima con diferentes velocidades de empuje.



**Figura 24:** Variación de la tensión máxima con diferentes velocidades de empuje.

Ahora se mostrarán dos tablas. En la primera de ellas, se plasmarán de manera ordenada los resultados de estas gráficas, mientras que en la segunda se calcularán los rangos, entre la máxima y la mínima velocidad analizadas, de cada uno de los parámetros.

**Tabla 24:** Comparación de los diferentes valores de tensión según la velocidad de empuje.

Velocidad de empuje (m/s)	Frío		Caliente	
	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)
0,01	<b>979</b>	<b>989</b>	<b>141</b>	<b>263</b>
0,1	977	990	250	277
0,8	<b>974</b>	991	288	324
2	976	991	300	358
8	978	<b>992</b>	<b>343</b>	<b>412</b>

**Tabla 25:** Rango de tensiones para cada caso entre la velocidad máxima y la mínima escogida.

	<b>Rango de valores (MPa)</b>
Tensión mínima frío (MPa)	<b>5</b>
Tensión máxima frío (MPa)	<b>3</b>
Tensión mínima caliente (MPa)	<b>202</b>
Tensión máxima caliente (MPa)	<b>149</b>

No sólo no hay prácticamente variación alguna entre los diferentes valores de la velocidad de empuje en el conformado en frío, sino que tampoco hay ningún cambio entre los puntos de tensión máxima y la mínima de la pieza.

El valor de tensión en cualquier zona después del forjado es prácticamente constante.

Con los valores obtenidos sí se puede concluir fehacientemente que a temperatura constante la velocidad de empuje no es un parámetro relevante (salvo para la velocidad final adquirida en la pieza).

Para el conformado en caliente sí se observa un incremento de tensión conforme se eleva la velocidad de empuje.

#### 6.9.5 Temperatura

**Tabla 26:** Incremento de temperatura variando la velocidad de empuje.

Velocidad (m/s)	Temperatura de conformado (°C)	Temperatura máxima (°C)	<b>Porcentaje de incremento (%)</b>
0,01	800	843	<b>5,375</b>
0,1	800	843	<b>5,375</b>
0,8	800	900	<b>12,5</b>
2	800	904	<b>13</b>
8	800	952	<b>19</b>

De esta tabla se obtiene que existe también una relación directa entre el aumento del empuje y el incremento de temperatura en caliente (para el mismo valor de temperatura de conformado).

Todos los parámetros en el conformado en caliente se afectados, ya que todos dependen en menor o mayor medida de la temperatura.

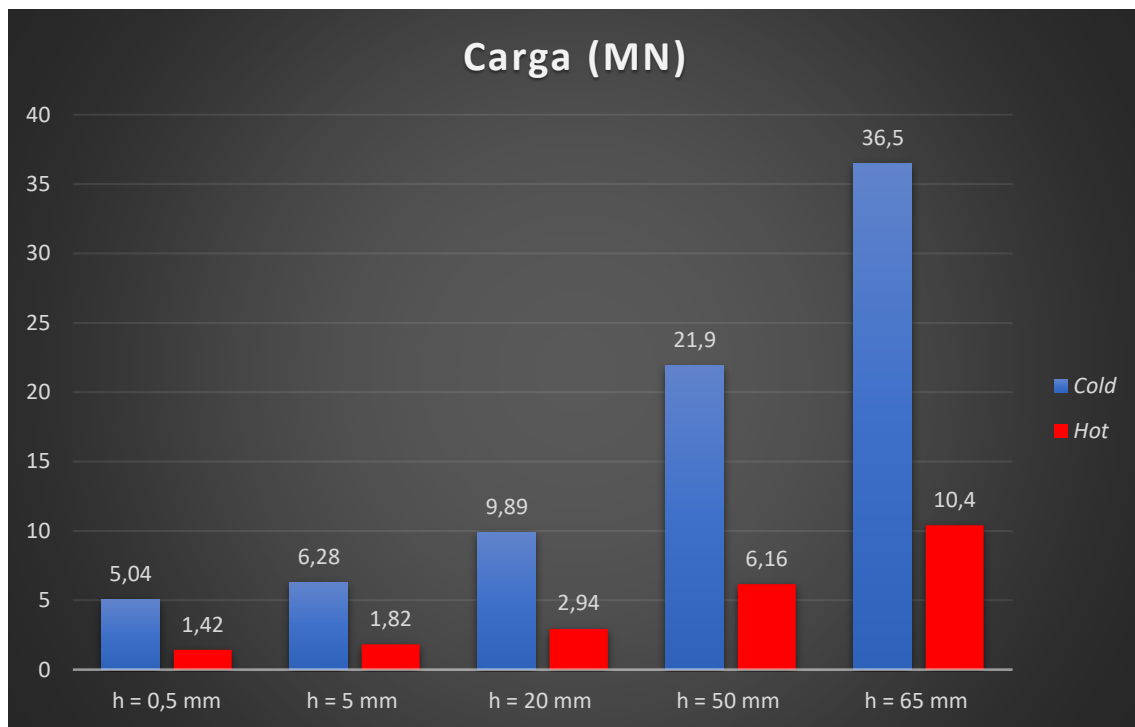
Como conclusión general se debe destacar lo siguiente: a temperatura constante en el conformado en frío, los resultados apenas varían (excepto el de la velocidad).

## 6.10 Variación de la carrera

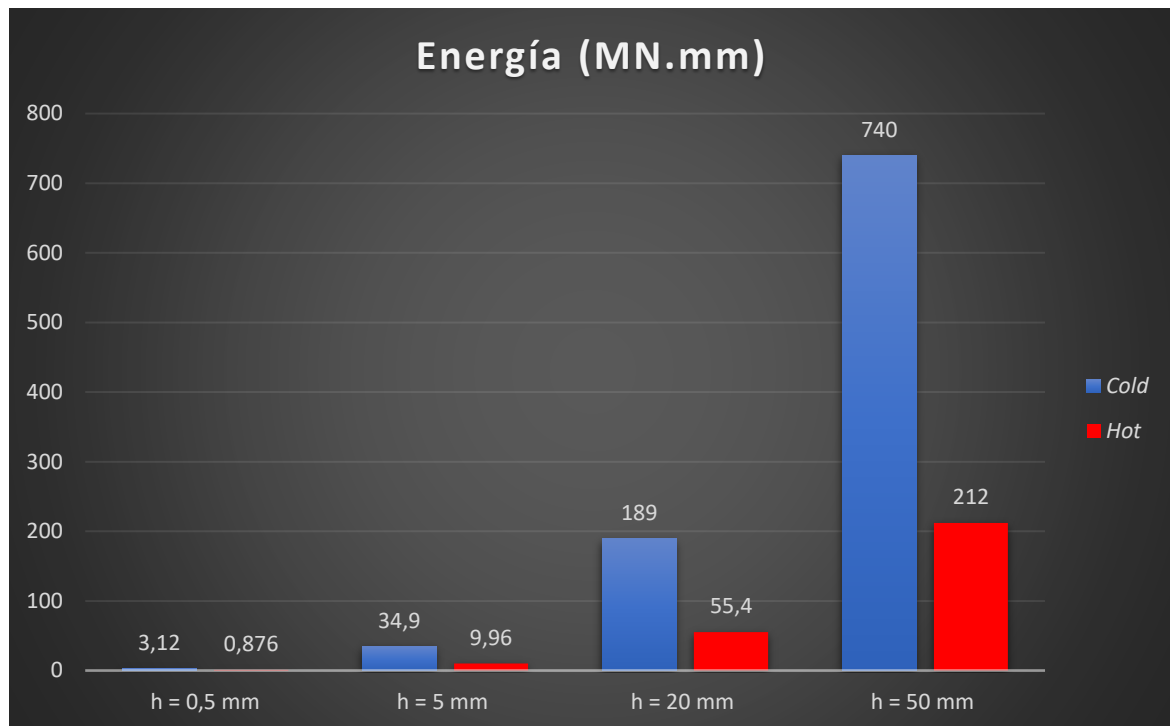
En este punto se estudiarán los cambios en las distintas propiedades cuando se varía la **carrera,  $h$  (*stroke*)** en el forjado, es decir, los mm que bajará la herramienta en el empuje o en el golpe. Con varios valores, algunos de ellos muy bajos y otros excesivamente altos, es decir, muy alejados de la realidad, se llegará a distintas conclusiones.

Se ha seleccionado 0,5 mm el menor valor de  $h$ . Claramente, el programa no podría dar un resultado si  $h$  fuera nulo, ya que significaría que no se produce el forjado, pero 0,5 mm es un valor muy pequeño. Por el contrario, para  $h = 65$  mm el resultado es completamente irreal, la pieza se llega a aplastar por completo, produciendo una especie de disco, y como ya se comentó en numerosas ocasiones, los resultados que se obtendrán partiendo de parámetros irreales, se alejarán completamente de la realidad.

### 6.10.1 Carga y energía



**Figura 25:** Variación de la carga para diferentes valores de carrera.

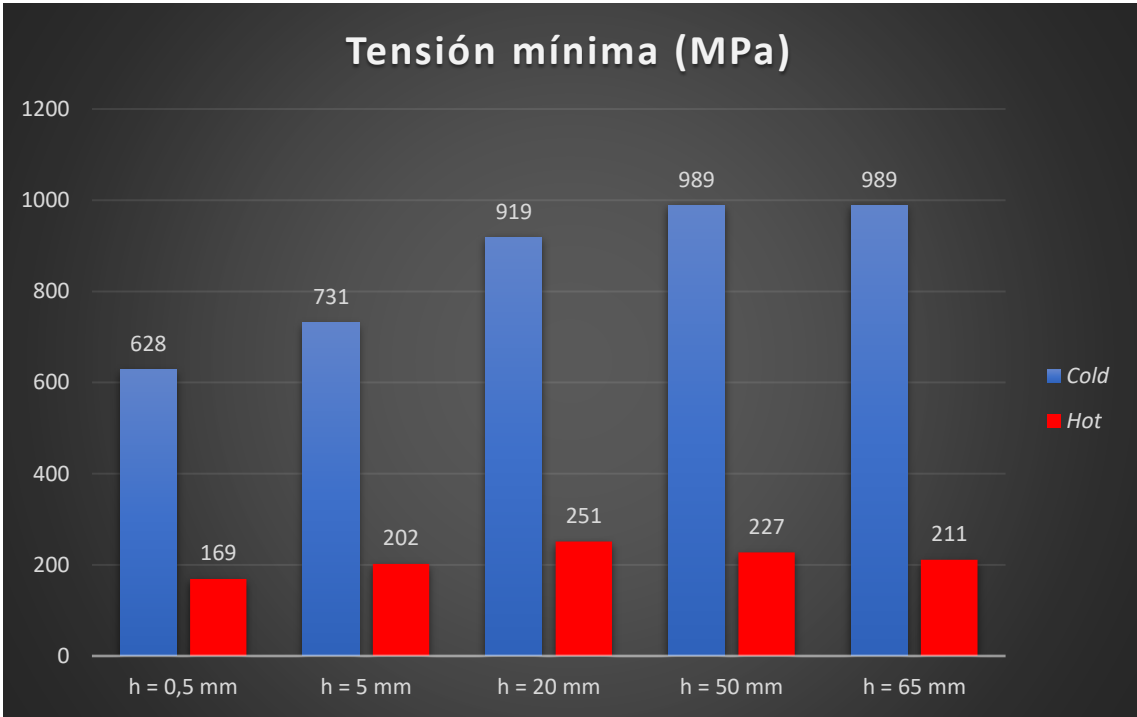


**Figura 26:** Variación de la energía para diferentes valores de carrera.

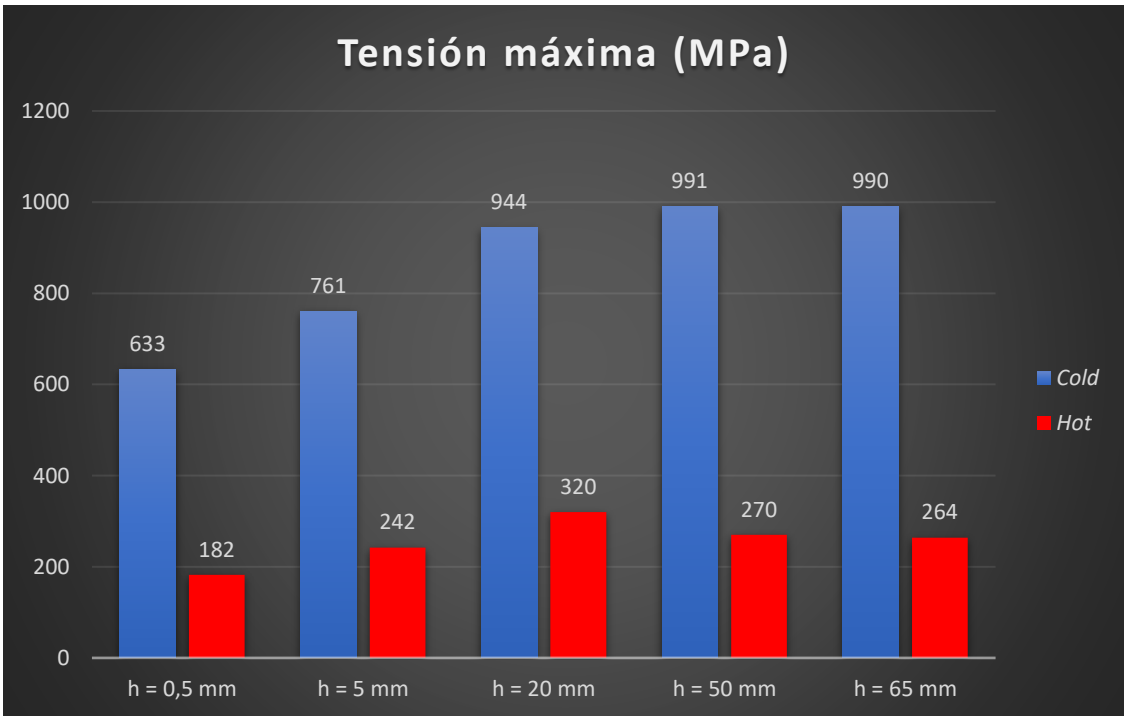
Como se puede apreciar, tanto la carga como la energía, aumentan siempre de manera lineal conforme  $h$  va incrementándose. No importa el tipo de conformado o si los valores de  $h$  son completamente irreales, siempre crecerán siguiendo el mismo patrón.



6.10.2 Tensiones



**Figura 27:** Variación de la tensión mínima para diferentes valores de carrera.



**Figura 28:** Variación de la tensión máxima para diferentes valores de carrera.

Los valores de tensión en el conformado en frío se van estabilizando a medida que  $h$  aumenta, hasta que se vuelven prácticamente constantes ( $Tensión_{\min} \approx Tensión_{\max}$  para 50 y 65 mm) este hecho se refleja en la poca variación de la diferencia de tensiones en comparación con los valores de conformado en caliente.

Por otro lado, los valores de tensión en caliente siguen una especie de curva donde el máximo no tiene lugar en los valores más elevados, sino el valor intermedio a  $h = 20$  mm.

### 6.10.3 Velocidad

**Tabla 27:** Análisis de la velocidad máxima para diferentes valores de carrera.

Carrera (mm)	Velocidad máxima frío (m/s)	Velocidad máxima en caliente (m/s)	Rango entre frío y caliente (m/s)
0,5	0,205	0,203	<b>0,002</b>
5	0,206	0,204	<b>0,002</b>
20	0,213	0,209	<b>0,004</b>
50	0,294	0,290	<b>0,004</b>
65	0,369	0,536	<b><u>-0,167</u></b>

**Tabla 28:** Análisis de la velocidad mínima para diferentes valores de carrera.

Carrera (mm)	Velocidad mínima en frío (m/s)	Velocidad mínima en caliente (m/s)	Rango entre frío y caliente (m/s)
0,5	0,0257	0,0254	<b>0,0003</b>
5	0,0259	0,0257	<b>0,0002</b>
20	0,0533	0,0524	<b>0,0009</b>
50	0,1840	0,1820	<b>0,002</b>
65	0,4910	0,4030	<b><u>0,088</u></b>

Cuánto más bajo es el empuje el rango de velocidades entre frío y caliente comienza a ser cada vez menor, es decir,  $V_{\text{frío}} \approx V_{\text{caliente}}$ .

La diferencia de velocidades máximas es negativa, por lo que la velocidad máxima en el conformado en frío es inferior al conformado en caliente. Como ya se ha repetido, este valor de  $h$  es completamente irreal, por lo que los resultados que proponga Deform-3D también distarán de lo que ocurra en la realidad, aunque nos plasme una solución numérica, llegando a superar los valores del conformado en caliente a los valores de deformación en frío.

Cuanto menor es la carrera, las velocidades entre el conformado en frío y en caliente apenas varían, siendo  $\Delta$  un valor cada vez menor. Esto es así por la siguiente razón: cuando la  $h$  es muy pequeña, significa que la pieza realiza un pequeño recorrido, y que todos los resultados numéricos (de carga, energía o tensiones) también serán pequeños, siendo el caso límite  $h = 0$  mm donde todos los resultados sean cero. Eso explica que el rango de velocidad se también pequeño ya que la velocidad máxima adquirida en un punto de la pieza es muy cercada a la inferior de la base de la preforma.

Por lo tanto, se puede concluir como normal general, que puntos de partida y parámetros reales, sí dan lugar a resultados coherentes.

#### 6.10.4 Temperatura

**Tabla 29:** Porcentaje de incremento producido para diferentes valores de carrera.

Carrera (mm)	Temperatura de conformado (°C)	Temperatura máxima alcanzada (°C)	Porcentaje de incremento (%)
0,5	800	800	0
5	800	803	0,375
20	800	819	2,275
50	800	883	10,375
65	800	884	10,5

Primero de todo, la temperatura no se demasiado afectada por el cambio de  $h$ , y a medida que la carrera comienza a ser más elevada, hasta llegar al límite, (entre 65 y 70 mm la preforma después del impacto comienza a verse casi plana) los valores de temperatura comienzan a estabilizarse.

El porcentaje de incremento de temperatura aumenta a medida que se incrementa  $h$ , de igual manera que pasaba cuando se elevaba la velocidad de empuje. Esto conlleva que el aumento de la carrera y la velocidad de empuje están relacionados.

La única excepción es  $h = 0,5$  mm, la variación de la preforma es tan pequeña, que a efectos prácticos es como si no hubiera sucedido nada, por eso la temperatura final es la misma que la del conformado de la pieza y no se produce incremento alguno de este parámetro.

Bien es cierto, que la temperatura final siempre será mayor conforme aumentemos la carrera, pero el valor más alto que se podría conseguir (que estaría en torno a  $h = 50$  mm) daría un aumento de poco más del 10 %, por lo que si lo que se pretende es conseguir un incremento considerable de la temperatura final de la pieza, sería mejor elevar otros parámetros como puede ser la velocidad de empuje.

## **6.11 Variación del diámetro de la preforma**

En este apartado se utilizarán dos materiales diferentes: por un lado, DIN-100Cr6 y el acero AISI-1045, tanto para caliente como para frío. En el conformado en caliente se ha utilizado una temperatura de 950 °C (correspondiente al rango de deformación en caliente) y en frío una temperatura constante de 20 °C.

El material DIN-100Cr6 es también un acero, posee gran resistencia al desgaste.

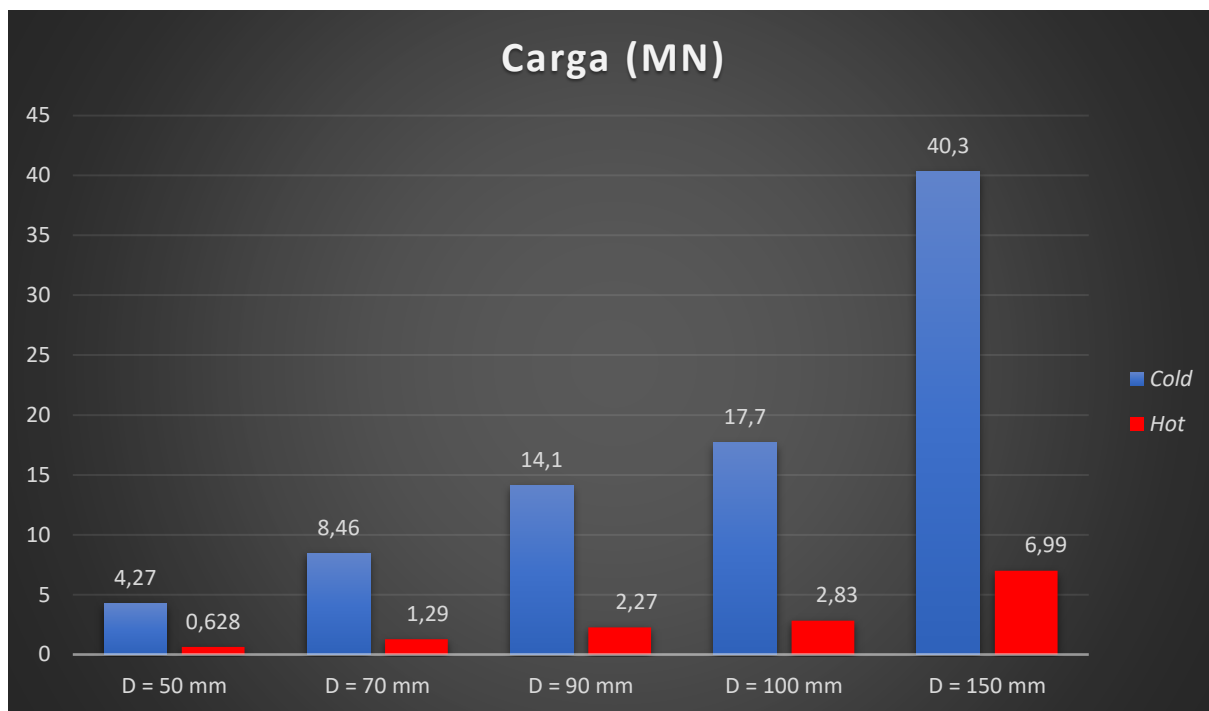
Cuando se hable del material, se referirá al acero 100Cr6. En cambio, cuando se hable del acero AISI-1045 se especificará.

En este apartado se han realizado tres análisis: variación de la preforma en frío, variación en caliente, por último, la modificación de las estampas con las mismas condiciones aplicadas en la preforma. También se han utilizado dos aceros diferentes para hacer varias comparaciones entre ellos.

### **6.11.1 Carga y energía**

Las preguntas que se deben plantear son las siguientes: ¿en qué punto se producirá un mayor incremento de los valores de carga y energía en relación al aumento del diámetro?, ¿únicamente influirá la geometría o la temperatura también jugará un papel relevante?

Como siempre, la carga y la energía son mayores en el conformado en frío que en el caliente. Como se sabe menos más deformar un material en caliente a elevada temperatura que en frío: mayor potencia se traduce en grandes fuerzas necesarias para llevar a cabo el proceso.

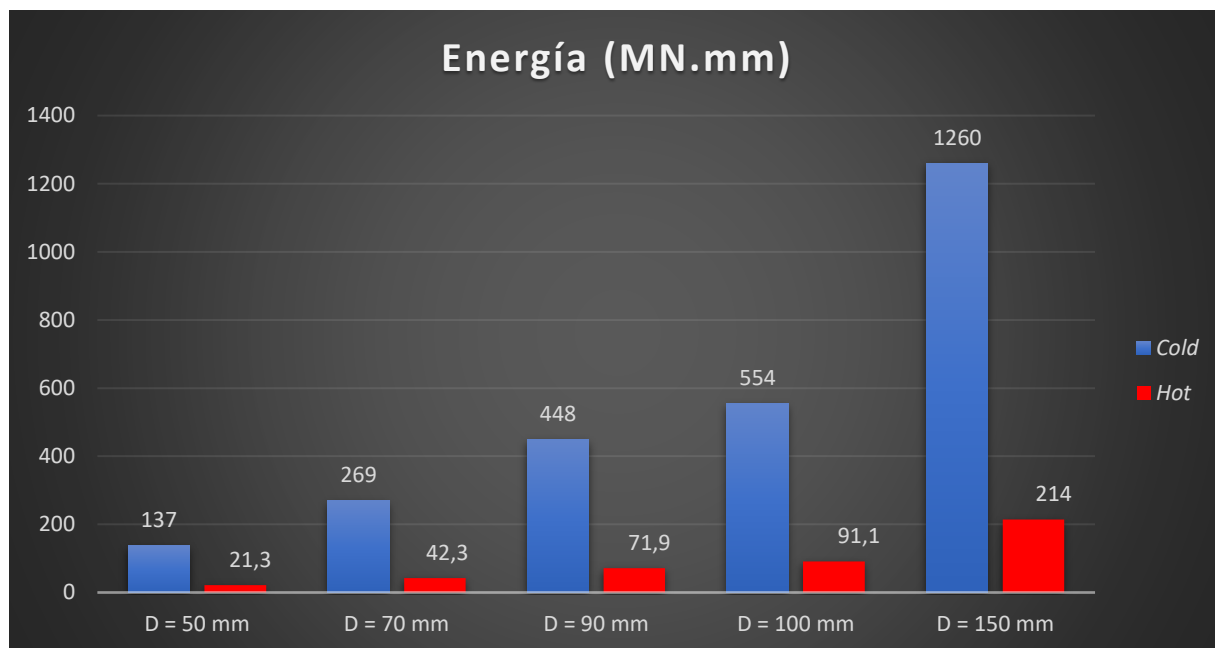


**Figura 29:** Variación de la carga para diferentes valores del diámetro.

Una de las conclusiones más notorias a las que se puede llegar, es que a medida que se aumenta el diámetro, la diferencia entre los valores de frío y de caliente (para un mismo diámetro) es cada vez mayor.

**Tabla 30:** Rango de carga entre frío y caliente para diferentes diámetros.

Diámetro (mm)	Carga en frío (MN)	Carga en caliente (MN)	Rango de carga entre frío y caliente para un mismo diámetro (MN)
50	4,27	0,628	3,642
70	8,46	1,29	7,17
90	14,1	2,27	11,83
100	17,7	2,83	14,87
150	40,3	6,99	33,31



**Figura 30:** Variación de la energía para diferentes valores del diámetro.

De igual manera para el estudio de la energía:

**Tabla 31:** Rango de energía entre frío y caliente para diferentes diámetros.

Diámetro (mm)	Energía en frío (MN.mm)	Energía en caliente (MN.mm)	Rango de energía entre frío y caliente para un mismo diámetro (MN.mm)
50	137	21,3	115,7
70	269	42,3	226,7
90	448	71,9	376,1
100	554	91,1	462,9
150	1.260	214	1.046

Como se puede observar de las tablas 30 y 31 es que a mayor área, mayor carga y energía. En ningún momento se produce un pico de valor o comienza a decrecer los resultados, y estos crecen de manera constante a razón del aumento de superficie (nunca de manera exponencial). Sin embargo, no se puede aumentar el diámetro hasta el infinito ya que mecánicamente es imposible y la preforma debe ser cilíndrica y, por otro lado, como se verá a seguidamente la variación de diámetro también repercute en la velocidad adquirida en los distintos puntos de la pieza.

Con el material AISI-1045, la tendencia, tanto de la carga como de la energía, es igual. A mayor diámetro, mayores resultados sin existir un valor máximo (aunque se sabe que en la realidad

alcanzado cierto valor la pieza rompe). Los resultados no serán iguales puesto que el material es diferente, sin embargo, será similar. Aquí se adjunta la tabla comparativa para el conformado en frío:

**Tabla 32:** Comparación de la carga y la energía de los dos aceros. Conformado en frío.

<b>DIN-100Cr6</b>	<b>Carga (MN)</b>	<b>Energía (MN.mm)</b>
D = 50 mm	4,27	137
D = 100 mm	17,7	554
<b>AISI-1045</b>	<b>Carga (MN)</b>	<b>Energía (MN.mm)</b>
D = 50 mm	3,87	124
D = 100 mm	16	504

Y para el conformado en caliente:

**Tabla 33:** Comparación de la carga y la energía de los dos aceros. Conformado en caliente.

<b>DIN-100Cr6</b>	<b>Carga (MN)</b>	<b>Energía (MN.mm)</b>
D = 50 mm	0,628	21,3
D = 100 mm	2,83	91,1
<b>AISI-1045</b>	<b>Carga (MN)</b>	<b>Energía (MN.mm)</b>
D = 50 mm	0,631	22,1
D = 100 mm	2,91	93,7

Como conclusión se obtiene que el material influye, al igual que el aumento del diámetro. Pero el que las gráficas sigan una tendencia u otra (valores constantes, crecimiento, anomalías...), no depende de los materiales, sino de los valores escogidos para el estudio.

### 6.11.2 Relación entre la tensión y la temperatura

¿De qué manera influye la temperatura y la geometría en los cambios de tensión efectiva?

Los valores de la tensión (tanto el valor máximo como el mínimo) son iguales independientemente de la geometría de la pieza cuando deformamos en frío. Por consiguiente, se llega a la conclusión de que cuando la temperatura es un parámetro constante, el área de la preforma no es un parámetro significativo.

**Tabla 34:** Rango de tensión para diferentes valores de diámetro. Frío. DIN-100Cr6.

Diámetro (mm)	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Rango (MPa)
50	<b>1070</b>	<b>1110</b>	40
70	<b>1070</b>	<b>1110</b>	40
90	<b>1070</b>	<b>1110</b>	40
100	<b>1070</b>	<b>1110</b>	40
150	<b>1070</b>	<b>1100</b>	40

Ahora se verá que ocurre con el otro material AISI-1045 para el conformado en frío:

**Tabla 35:** Rango de tensión para diferentes valores de diámetro. Frío. AISI-1045.

Diámetro (mm)	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Rango (MPa)
50	<b>975</b>	<b>990</b>	15
100	<b>977</b>	<b>990</b>	13
200	<b>976</b>	<b>990</b>	14

Si la temperatura es constante, la tensión no cambiará de valor, independientemente de la geometría y del material.

Ahora bien, como se puede apreciar cuando la pieza se deforma en caliente, si hay una ligera variación de los valores de presión conforme se aumenta el diámetro, pero esa ligera diferencia es directamente proporcional al pequeño aumento de la temperatura como se puede apreciar en las tablas consecutivas.

**Tabla 36:** Rango de tensión para diferentes valores de diámetro. Caliente. DIN-100Cr6.

Diámetro (mm)	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	<b>Rango (MPa)</b>
50	<b>125</b>	<b>189</b>	64
70	<b>140</b>	<b>205</b>	65
90	<b>143</b>	<b>206</b>	63
100	<b>140</b>	<b>171</b>	31
150	<b>148</b>	<b>194</b>	46

De igual modo, para la deformación en caliente para AISI:



**Tabla 37:** Rango de tensión para diferentes valores de diámetro. Caliente. AISI-1045.

Diámetro (mm)	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Rango (MPa)
50	<b>132</b>	<b>205</b>	73
100	<b>142</b>	<b>216</b>	74
200	<b>155</b>	<b>195</b>	40

A simple vista puede parecer que las tensiones si varían conforme el diámetro aumenta, pero no es un cambio significativo:

El rango de valores (de todos los diámetros) de la tensión mínima es  $148 - 125 = 23$  MPa, y para las máximas se tiene  $206 - 171 = 35$  MPa (recordar que el rango de las tensiones en frío es cero).

Para  $D = 100$  mm, el valor escogido de la preforma en las otras series de forjas, se tiene el valor más bajo de diferencia de tensiones, con un valor mínimo no demasiado bajo y la máxima corresponde a un valor no muy elevado (el rango de tensiones es más homogéneo). Estamos ante un cilindro con el diámetro igual a la altura.

¿Por qué ocurre esto?, es decir, para el conformado en caliente sí varía los valores de tensión efectiva para distintos valores de diámetro y también para diferentes materiales. Recordar que esta característica ya se había dado en los puntos que se analizaba la variación de la carrera de la pieza y la velocidad de empuje: únicamente los valores de tensión permanecían constantes para el conformado en frío.

En el punto 6.2.1 donde se analizaban las diferencias entre *cold*, *warm* y *hot* para varios valores de temperatura, sí existía un aumento de los valores de tensión en el conformado en frío. Observémoslo en la siguiente tabla:

**Tabla 38:** Variación de la tensión para diferentes temperaturas y diferentes estudios.

Temperatura (°C)	Tensión mínima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Rango (MPa)	Variación parámetros
300	797	859	62	Ninguno
500	634	703	69	Ninguno
800	249	280	31	Ninguno
2000	<b>1,48</b>	<b>1,48</b>	<b>0</b>	Ninguno
<b>20</b>	<b>976</b>	<b>991</b>	<b>15</b>	v = 0,2 m/s
<b>20</b>	<b>978</b>	<b>992</b>	<b>14</b>	v = 8 m/s
<b>20</b>	<b>989</b>	<b>991</b>	<b>2</b>	h = 50 mm
<b>20</b>	<b>989</b>	<b>990</b>	<b>3</b>	h = 65 mm
<b>20</b>	<b>975</b>	<b>990</b>	<b>15</b>	D = 50 mm
<b>20</b>	<b>976</b>	<b>990</b>	<b>14</b>	D = 200 mm

De aquí se puede afirmar, sin lugar a dudas, que la tensión no varía en el conformado en frío por encontrarse a temperatura ambiente de 20 °C, sea cuales sean los parámetros que se modifiquen, ya que cuando se varía esa temperatura, sí se produce un cambio en la tensión.

Los valores en los que oscila la tensión a temperatura ambiente varían entre 975 y 992 MPa, es decir, el rango es de 17 MPa.

Por otro parte, como ya se ha repetido en varias ocasiones, cuando nos encontramos ante un caso imposible como puede ser una temperatura de 2000 °C, los valores de tensión son extremadamente bajos y constantes. El programa siempre nos dará un valor numérico, aunque el proceso sea imposible de poder ser realizado.

Seguidamente, se examinará la diferencia de temperaturas entre la máxima alcanzada y a la que ocurre el proceso.

**Tabla 39:** Incremento de la temperatura final para diferentes diámetros. DIN-100Cr6.

Diámetro (mm)	Temperatura de conformado (°C)	Temperatura máxima alcanzada (°C)	Porcentaje de incremento (%)
50	950	<b>986</b>	<b>3,78</b>
70	950	<b>988</b>	<b>4</b>
90	950	<b>985</b>	<b>3,68</b>
100	950	<b>983</b>	<b>3,47</b>
150	950	<b>982</b>	<b>3,36</b>

Y para el acero AISI, tampoco hay variación de la temperatura máxima alcanzada:

**Tabla 40:** Incremento de la temperatura final para diferentes diámetros. AISI-1045.

Diámetro (mm)	Temperatura de conformado (°C)	Temperatura máxima alcanzada (°C)	Porcentaje de incremento (%)
50	950	<b>988</b>	<b>4</b>
100	950	<b>984</b>	<b>3,57</b>
200	950	<b>983</b>	<b>3,47</b>

Como se puede apreciar, la diferencia de temperaturas entre cada valor de diámetro es prácticamente despreciable.

Con el estudio, se llega a la conclusión de que la temperatura y la tensión en el conformado en caliente están directamente relacionadas (independientemente de la geometría escogida) y que la temperatura máxima alcanzada es un parámetro independiente del área de la preforma (partiendo de las mismas condiciones en el estudio).

### 6.11.3 Variación de la velocidad

Se debe especificar que está velocidad es la que tiene la pieza en cada uno de sus puntos después del proceso de forjado (mayor en la parte de arriba en contacto con la estampa superior, no la velocidad constante del empuje de la herramienta de la forja).

La variación de la velocidad está directamente relacionada con la superficie de la preforma, tomando esta variable un papel fundamental. La segunda ley de Newton dice: *“la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él e inversamente proporcional a la masa del objeto”*.

$$F = m \cdot a \quad (2)$$

Así, que si variamos el área de la preforma, este cambio afectará a la aceleración, lo que se traducirá en una variación de velocidad.

Para frío:

**Tabla 41:** Variación de la velocidad para varios diámetros. Conformado en frío.

Diámetro (mm)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Rango (m/s)
50	0,0526	0,21	<b>0,1574</b>
70	0,0828	0,221	<b>0,1382</b>
90	0,117	0,235	<b>0,118</b>
100	0,173	0,276	<b>0,103</b>
150	0,180	0,288	<b>0,108</b>

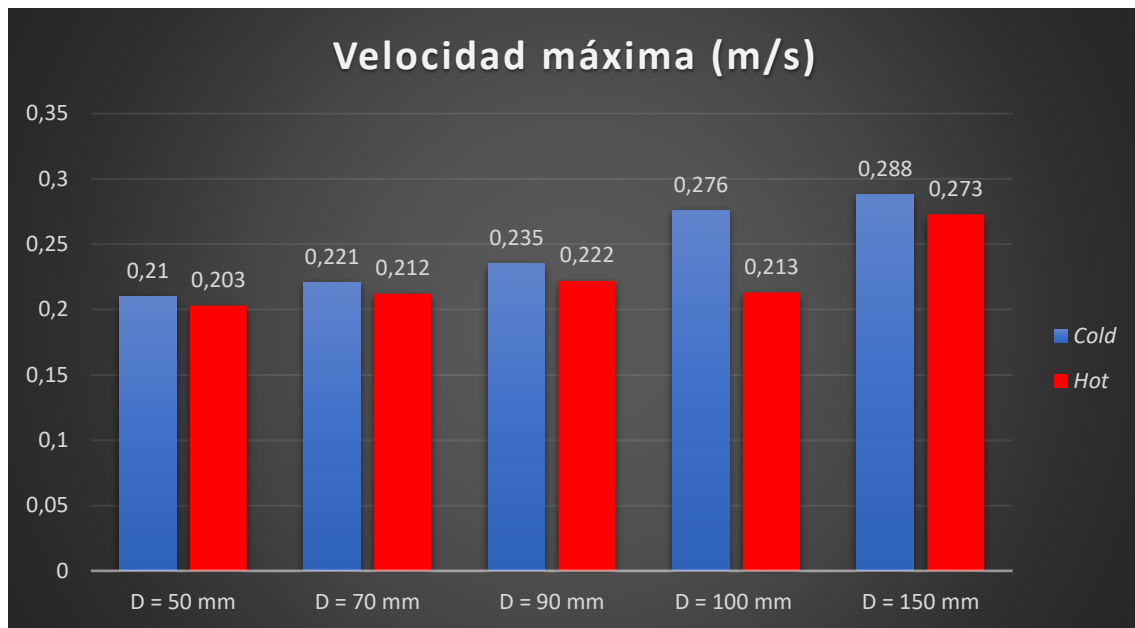
En cambio, para caliente se obtiene los siguientes resultados:

**Tabla 42:** Variación de la velocidad para varios diámetros. Conformado en caliente.

Diámetro (mm)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Rango (m/s)
50	0,0254	0,203	<b>0,1776</b>
70	0,0532	0,212	<b>0,1588</b>
90	0,0833	0,222	<b>0,1387</b>
100	0,0918	0,213	<b>0,1212</b>
150	0,171	0,273	<b>0,102</b>

Se observa claramente que a medida que aumenta la superficie, el rango entre el valor máximo de velocidad y el mínimo comienza a disminuir (esta diferencia es más notoria cuando el trabajo es en frío).

Para el conformado en frío los valores de velocidad máxima a medida que lo hace el área (cuando estamos a temperatura constante), pero en la deformación en caliente no ocurre eso (al meter la variable de la temperatura). Es por ello, que la variación de la temperatura sí afecta al comportamiento de la velocidad.



**Figura 31:** Variación de la velocidad máxima para diferentes valores del diámetro.

La velocidad y el área se encuentran relacionados mediante las dos fórmulas que se vieron anteriormente: la relación de fuerza y superficie y la segunda Ley de Newton.

En  $D = 100$  mm (el valor de preforma elegida) la velocidad máxima es menor que para un diámetro menor, pero la gráfica muestra para una mayor área de contacto, mayor velocidad adquirida después del forjado. Ese valor se encuentra relacionado con la tensión, y que como se analizó anteriormente en  $D = 100$  mm la presión máxima era menor que la tendencia observada para otros valores.

Y en último lugar, la diferencia entre los valores del conformado en frío y en caliente para un mismo valor de velocidad son los siguientes:

**Tabla 43:** Comparación entre frío y en caliente para los valores de velocidad máxima.

Diámetro (mm)	Rango entre los valores de frío y caliente para un mismo diámetro, para la velocidad mínima (m/s)	Rango entre los valores de frío y caliente para un mismo diámetro, para la velocidad máxima (m/s)
50	0,007	0,0272
70	0,009	0,0296
90	0,013	0,0337
100	0,063	0,0812
150	0,009	0,0150

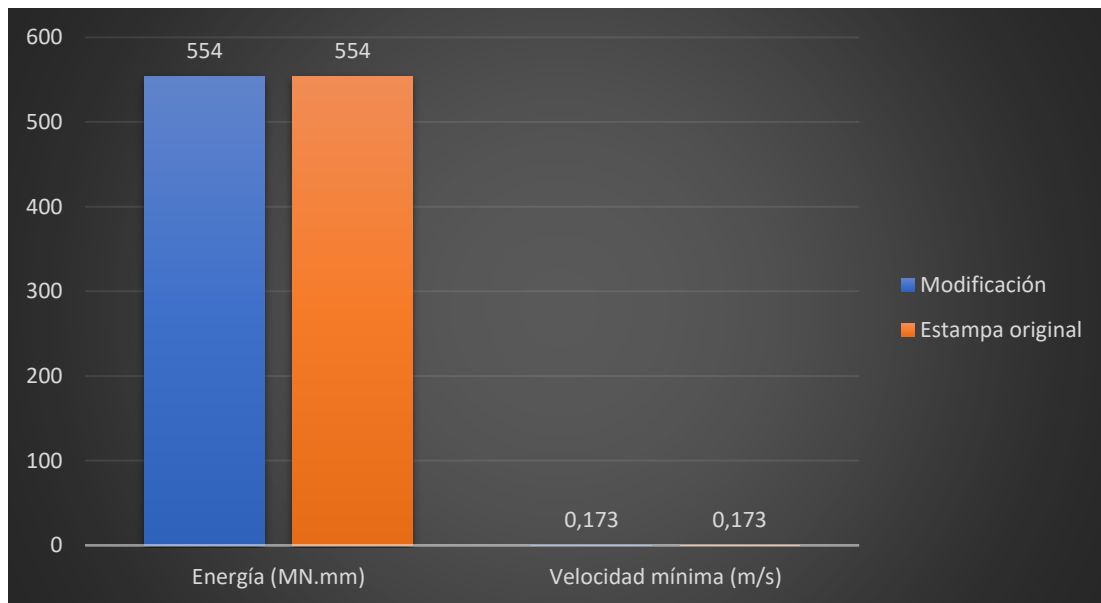
En primer lugar, a mayor área mayor velocidad. En segundo lugar, a medida que la superficie aumenta, la diferencia entre los valores máximos y mínimos comienza a ser menor (rango).

#### 6.11.4 Variación de las estampas

A la hora de realizar el modelo el programa seleccionó la opción de calcular la variación de temperatura exclusivamente en la preforma sin tener en cuenta las estampas. Para realizar el proceso de forjado eran necesarias dos estampas, una en cada extremo, ya que en el caso contrario nos daría error y se eligió una de  $D = 170 \text{ mm}$  y  $H = 10 \text{ mm}$ .

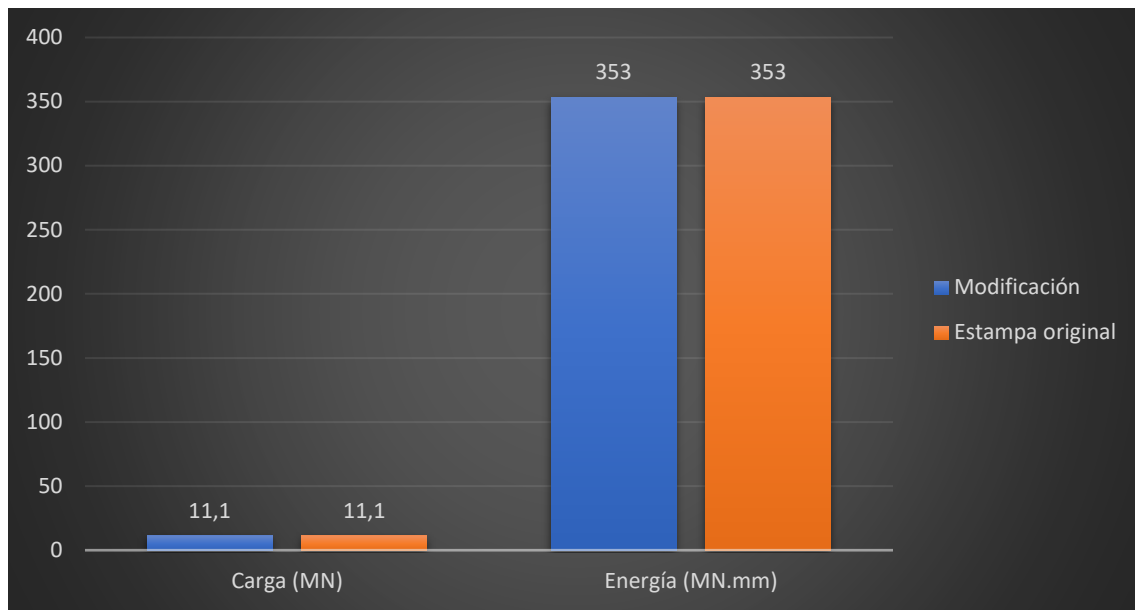
Por consiguiente, se comprobará que aunque se varíe la geometría de las estampas el resultado de cualquier parámetro será exactamente el mismo que en relación a la estampa original.

En el primer análisis que se ha efectuado en frío, la estampa modificada tiene un diámetro de  $160 \text{ mm}$  y una altura de  $15 \text{ mm}$  (la preforma sigue siendo de  $100 \text{ mm}$  de diámetro).



**Figura 32:** Variación de la energía y la velocidad mínima modificando las estampas.

En el siguiente en cambio, los valores de energía y velocidad serán comparados, con una la estampa modificada tiene un diámetro de  $140 \text{ mm}$  y una altura de  $10 \text{ mm}$  (la preforma es de  $80 \text{ mm}$ ).



**Figura 33:** Variación de la carga y la energía modificando las estampas.

## 6.12 Estudio de la temperatura máxima alcanzada después del proceso

Después de haber realizado todos los análisis anteriores donde la temperatura y el tipo de conformado han sido bastante relevantes, se recapitularán las deducciones obtenidas.

En primer lugar, todos los parámetros en el conformado en tibio o caliente se ven ligeramente afectados, ya que todos dependen en menor o mayor medida de la temperatura, aunque unos más que otros. Esta afirmación tiene sentido, y que la ecuación de comportamiento que sigue el material elegido es:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (3)$$

En segundo lugar, a medida que vamos aumentando la temperatura del proceso, la diferencia de valores entre el conformado y la temperatura máxima alcanzada es menor, hasta que llegamos a la fusión donde ya se comentó que ambas temperaturas son iguales.

La temperatura máxima siempre será superior a la temperatura del proceso, o igual cuando esa temperatura sobrepasa el punto de fusión, pero nunca será inferior.

¿Por qué ocurre esto?, ¿qué hace el programa a nivel interno?

Como se ya ha dicho en numerosas ocasiones, salvo cuando nos encontramos realizando un conformado en tibio o caliente que el programa no nos deja seleccionar un material hecho para el conformado en frío, con un único valor de temperatura de operación, siempre en cualquier circunstancia Deform-3D dará un resultado numérico, pero cuando ese caso sea imposible en la realidad, los resultados también serán ilógicos y extraños y no seguirán ningún patrón de comportamiento.

En tercer lugar, cuando se deforma en frío una pieza, la temperatura final siempre será la inicial de la final, por lo que el proceso se realiza a temperatura constante (independientemente de que ese valor sea bajo o alto).

Por último, se enunciarán varios planteamientos importantes para reflexionar, que no se mencionaron anteriormente.

¿La variación de qué parámetros iniciales producirá un mayor incremento de temperatura? Subirá de la misma manera la temperatura máxima, ¿o dependerá de otros parámetros como el diámetro de la preforma, la velocidad de empuje, la herramienta utilizada o la carrera asignada?

A mayor velocidad de empuje, mayor incremento del porcentaje de variación respecto al valor inicial.

A medida que elevemos la temperatura de conformado en caliente (partiendo de los mismos parámetros iniciales, es decir, carrera, empuje material...) la diferencia entre el valor máximo alcanzado y el valor del conformado será menor y por consiguiente el % de incremento respecto a la temperatura inicial irá disminuyendo también.



## 7 CONCLUSIONES

---

En este último apartado, se numerarán todas y cada una de las diferentes conclusiones que se han ido obteniendo a lo largo del documento:

- El mallado escogido ha sido de 35.000 elementos. A partir de ese tamaño de malla las variaciones de los resultados tienen un error menor del 1 %.

- No hay ninguna diferencia entre el conformado en tibio y en caliente para un mismo material y temperatura.

- No se tomará en cuenta la recrystalización, es decir, suponemos que tiene lugar a nivel interno en el programa cuando la temperatura escogida es superior al  $0,5 \cdot T_{\text{fusión}}$ , pero no será un parámetro que se pueda contabilizar en las diferentes series de forjas.

- Por normal general, se observa una mayor variación de la carga, la energía, la velocidad máxima o las tensiones, cuando modificamos los parámetros iniciales del estudio (temperatura escogida, tipo de conformado, carrera...) que cuando se modifica el tipo de acero.

- Un mismo material con diferente rango de temperaturas, tendrá propiedades mecánicas diferentes. Como conclusión, se puede asegurar que leyes de comportamiento diferentes darán lugar a resultados diferentes.

- El tiempo que dura el proceso de forjado no es un dato significativo en nuestro análisis. En cambio, la temperatura a la que se produce sí.

- Si el material es de tipo *COLD* ( $T = 20\text{ °C}$  y constante) los resultados obtenidos dependen exclusivamente del material escogido, no de la temperatura que elijamos, pero la máxima siempre será la temperatura elegida.

- Cuando se elige un material con un rango amplio de temperaturas (es decir, la temperatura no será constante) los resultados dependen del material, de la temperatura del proceso y del tipo de conformado (frío, tibio o caliente).

- Aunque los valores y las condiciones introducidas en Deform-3D sean imposibles de llevarse a cabo en la práctica, el programa siempre nos dará un valor numérico, sin embargo, nos proporcionará un valor muy bajo, nulo o que siga otro patrón diferente.

- Los materiales de la biblioteca del Deform-3D destinados únicamente al trabajo en frío, como AISI-1045 *COLD* ( $20\text{ °C}$ ), no se podrán usar para el conformado en tibio o en caliente. En cambio, un material con un amplio rango de temperaturas como el escogido, sí se podrá usar para distintos tipos de análisis con diferentes rangos de temperatura, superando incluso el límite de la fusión del material.

- Cuanto más nos alejemos de la realidad los valores entre el conformado en frío y en caliente son cada vez más pequeños, para los mismos datos de partida escogidos.

- Cuando se modifica la temperatura del proceso, todos los parámetros en el conformado en tibio o caliente se ven ligeramente afectados, ya que todos dependen de ésta en menor o mayor medida.

- A medida que vamos aumentando la temperatura del proceso, la diferencia de valores entre el conformado y la temperatura máxima alcanzada es menor.

- Cuando se realiza el forjado en frío (a temperatura constante), la temperatura final siempre será la inicial de la final, es decir, la temperatura no varía aunque se elija un valor correspondiente al rango de conformado en tibio o caliente.

- Cuando se produce la fusión del material, tanto en tibio como en caliente, la temperatura alcanzada siempre será igual a la temperatura de fusión escogida.

- La tensión sí depende directamente de la temperatura (tanto en frío como en caliente) sea cuales sean los parámetros que cambiemos. Únicamente cuando el conformado es en frío para una temperatura ambiente de 20 °C la presión se mantiene constante, se muestra un valor muy bajo o no sigue el mismo patrón de otras forjas.

- Los valores de tensión más elevados suelen producirse en la base y en la parte superior de la preforma. En cambio, los valores más pequeños se encuentran en el centro. La pieza sigue este patrón a menos que el caso estudiado no sea un caso que poder llevar a cabo.

- Para el conformado en frío a temperatura ambiente de 20 °C para el material escogido, los valores de tensión no cambian independientemente de los parámetros que se modifiquen (diámetro, carrera, velocidad de empuje...), a la par de que la distribución de tensiones tiene un comportamiento irregular o valores muy pequeños.

- Los mayores valores de tensión siempre se encuentran en la parte superior e inferior de la preforma salvo en los siguientes casos: fusión del material o forjado en frío a temperatura ambiente.

- La velocidad sigue siempre el mismo patrón: mayores velocidades en la parte superior y van decreciendo hasta llegar a la parte inferior.

- El número de pasos en cada una de las simulaciones siempre ha sido de 100 (el que prefijaba el programa partiendo de los valores introducidos), salvo cuando se utilizaron varias herramientas diferentes para el proceso de forjado, donde el número de pasos decrece considerablemente.

- Cuando se utiliza una herramienta en vez de aplicar una velocidad de empuje, el incremento de temperatura obtenido es bastante menor.

- Los valores del estudio obtenidos con el empuje de la prensa hidráulica a 200 mm/s se asemejan más al estudio de un proceso de forja utilizando una velocidad de empuje, que cuando se aplica un golpe de martillo o la prensa mecánica, especialmente se refleja en el número de pasos del proceso y el porcentaje de incremento de la temperatura final.

- Cuando se modifican los valores de la velocidad de empuje para el conformado en frío, salvo la velocidad obtenida a lo largo de la pieza, el resto de parámetros permanecen casi invariables.

- Tanto la carga como la energía aumentan siempre (de forma casi exponencial) conforme se aumenta la carrera,  $h$ . No importa el tipo de conformado o si nos encontramos con los valores extremos elegidos  $h = 0,5$  mm, prácticamente nulo o  $h = 65$  mm, donde la pieza se deformaría completamente.

- Los valores de tensión, tanto el máximo como en el mínimo, en el conformado en frío cuando se modifica la carrera se estabiliza a medida que  $h$  aumenta, hasta llegar a los valores más altos 50 y 65 mm ( $\text{tensión}_{\text{mín}} \approx \text{tensión}_{\text{máx}}$ ). Sin embargo, en la deformación en caliente éstos siguen una especie de curva donde el máximo no tiene lugar en los valores más elevados, sino en el valor intermedio a  $h = 20$  mm.

- Al haberse elegido la opción de modificar únicamente el cuerpo de la preforma, las estampas no influyen en el cálculo de los parámetros. Se ha elegido  $D = 170$  mm y  $H = 10$  mm de forma aleatoria.

- Cuando se aumenta el diámetro de la preforma, los valores de carga y energía siempre aumentan. Por otro lado, los valores de tensión permanecen constantes (la tensión máxima y la mínima son distintas, por lo que el rango de tensiones no es cero).

- Cuando se incrementa el diámetro, la diferencia entre los valores de frío y de caliente (para la misma preforma) es cada vez mayor.

- El material siempre influye en los resultados, pero cuando se analizan dos aceros de similares características mecánicas, la tendencia de los resultados no depende tanto de los materiales, sino de los valores escogidos para el estudio.

- Cuando la deformación es en frío, el aumento del diámetro de la preforma no va a influir en la variación de los valores de tensión, aunque el resultado mostrará un valor máximo y un mínimo diferentes. En cambio, cuando la deformación es en caliente, a medida incrementamos el valor del diámetro, el rango de tensiones va disminuyendo (en un caso extremo  $\text{tensión}_{\text{mín}} \approx \text{tensión}_{\text{máx}}$  y el rango sería cero), pero los valores de tensión son cada vez más elevados, tanto los máximos como los mínimos.

- La temperatura máxima alcanzada (en la deformación en caliente) no depende del aumento del área de la preforma.

- Siempre que cumple que el aumento del área de la preforma (es decir, aumento del diámetro) se traduce en mayor velocidad y a mayor superficie, el rango de velocidad comienza a ser menor.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Boothroyd, G. *Fundamentos del corte de metales y de las máquinas-herramienta*, McGraw-Hill, 1978.
- [2] William D. Callister, Jr. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Reverté, S.A.
- [3] *Cuestiones resueltas de tecnología de fabricación*. Sección de publicaciones. Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2013.
- [4] Mikell P. Groover *Fundamentos de manufactura moderna*, McGraw-Hill.
- [5] Wikipedia. *Leyes de Newton*. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes\\_de\\_Newton](https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Newton)
- [6] José Antonio Pero-Sanz Elorz *Ciencia e ingeniería de materiales. Estructura, transformaciones, propiedades y selección*, Cie Dossat 2000.
- [7] Wikipedia. *Presión*. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Presión>
- [8] Schey, J. A. *Introducción a los procesos de fabricación*, Ed. McGraw-Hill, 2002.
- [9] Wikipedia. *Tensión mecánica*. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Tensión\\_mecánica](https://es.wikipedia.org/wiki/Tensión_mecánica)
- [10] O. C. Zienkiewicz- R. L. Taylor *El Método de los Elementos Finitos. Formulación básica y problemas lineales*, McGraw-Hill.

